

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу**

«На правах рукопису»
УДК _____



«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему:

Автономна фотоелектрична насосна станція

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕП-91мп

_____ Федорос Юрій Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Теряєв Віталій Іванович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Рецензент ст. викладач Дубчак Євген Михайлович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2020 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація – електромеханічні системи автоматизації та електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Федоросу Юрію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автономна фотоелектрична насосна станція,

науковий керівник дисертації Теряєв Віталій Іванович, к.т.н, доц. ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 09.12.2020

3. Об'єкт дослідження: процеси електромеханічного перетворення енергії в автономній фотоелектричній насосній станції, відцентровий насос.

4. Вихідні дані: двигун об'єднаний з насосом; насос відцентровий; напір 59 м, подача 36 м3/год, напруга мережі 380 В; умови розташування УХЛ4.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести аналітичний огляд в області автономних систем енергопостачання, здійснити опис автономної фотоелектричної насосної станції, постановка задачі, обґрунтувати вимоги до електроприводу і системи автоматизації, провести дослідження, розрахувати потужність насосу, обрати: двигун та силове електрообладнання, скласти структурну схему автономної електромеханічної системи та моделюючу програму у пакеті Simulink програмного середовища Matlab, провести дослідження, розробити стартап - проект.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: загальний вид системи, графіки робочих характеристик фотопанелі, структурні схеми електроприводу насосу, графіки перехідних процесів роботи системи за результатами дослідження моделі в Simulink, схема електрична-принципова електромеханічної системи.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Теряєв В.І., Федорос Ю.М. Взаємозв'язана система електроприводів автономної фотоелектричної насосної станції. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2020)», Вінниця, 2020.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання 01.09.2020

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вступ Аналітичний огляд в області автономних систем енергопостачання	30.09.20	Виконано
2.	Опис автономної фотоелектричної насосної станції, постановка задачі, обґрунтування вимог до електроприводу і системи автоматизації	5.10.20	Виконано
3.	Розрахунок параметрів електромеханічної системи	19.10.20	Виконано
4.	Вибір силового електрообладнання	26.10.20	Виконано
5.	Розробка структурної схеми, синтез системи автоматичного керування (математична модель електроприводу, розрахунок параметрів складових електроприводу, структурно-параметричний синтез системи)	9.11.20	Виконано
6.	Дослідження і аналіз статичних і динамічних характеристик автоматизованого електропривода	16.11.20	Виконано
7.	Проектування системи керування електропривода (систем електропостачання, електричного захисту та автоматизації)	25.11.20	Виконано
8.	Розробка схеми електричної принципової і підключень (з'єднань) автоматизованого електропривода	25.11.20	Виконано
9.	Стартап-проект. Економічне обґрунтування технічних рішень	25.11.20	Виконано
10.	Висновки Список використаних джерел	30.11.20	Виконано
11.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини проекту	2.12.20	Виконано

Студент


 (підпис)

Юрій ФЕДОРС
 (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


 (підпис)

Віталій ТЕРЯСВ
 (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: сторінок – 111, рисунків – 41 , таблиць – 21, графічна частина на 6 листах А1.

Метою роботи є проектування автономної фотоелектричної насосної станції разом із теоретичним дослідженням та математичним моделюванням у програмному середовищі Matlab з використанням пакету Simulink. Дослідити працездатність системи при зміні вхідної напруги від джерела живлення. Розглянути вплив опромінення та температури на роботу фотопанелі. Провести аналіз динамічних та статичних характеристик системи, отриманих при моделюванні насосної установки.

В роботі проведено аналітичний огляд різновидів, принципу роботи, переваг та недоліків автономних джерел енергії. Розглянуто приклади промислового та транспортного застосування, особливості керування та моделювання автономних енергосистем.

Виконано вибір відцентрового насосу виходячи з вихідних даних напору та продуктивності, розраховано його потужність та обрано привідний асинхронний двигун, розроблено перетворювальний пристрій. Наведено математичні моделі асинхронного двигуна, фотопанелі. Розглянуті алгоритми керування електромеханічною системою.

НАСОСНА УСТАНОВКА, ФОТОПАНЕЛЬ, АВТОНОМНИЙ,
АСИНХРОННИЙ, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ІНВЕРТОР, АЛГОРИТМ,
КЕРУВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, SIMULINK

					141.c5128.12.МД		
		№ докум.	Підпис		<div style="text-align: center;">Автономна фотоелектрична насосна станція</div> <div style="text-align: center;">РЕФЕРАТ</div>		
Розроб.	Федорос Ю.М.						
Наук. керівн.	Теряев В.І.						
Н. Контр.	Бур'ян С.І.						
Затверд.	Пересада С. М.				<div style="text-align: center;">Літ. Арк. Аркушів</div> <div style="text-align: center;"> <div></div> <div>5</div> <div>111</div> </div> <div style="text-align: center;"> <i>НТУУ «КПІ ім.. І.Сікорського»</i> <i>Каф. АЕМС-ЕП</i> <i>Гр. ЕП -91мп</i> </div>		

SUMMARY

The master's dissertation contains: pages - 111, figures - 41, tables - 21, graphic part on 6 sheets of A1.

The aim of the work is to design an autonomous photovoltaic pumping station together with theoretical research and mathematical modeling in the Matlab software environment using the Simulink package. Investigate the performance of the system when changing the input voltage from the power supply. Consider the influence of radiation and temperature on the operation of the photo panel. To analyze the dynamic and static characteristics of the system obtained during the simulation of the pumping unit.

An analytical review of the types, principle of operation, advantages and disadvantages of autonomous energy sources is carried out. Examples of industrial and transport application, features of control and modeling of autonomous power systems are considered.

The choice of the centrifugal pump is made proceeding from initial data of pressure and productivity, its power is calculated and the driving asynchronous motor is chosen, the converter device is developed. Mathematical models of induction motor, photopanel are given. Algorithms of control of electromechanical system are considered.

PUMP INSTALLATION, PHOTO PANEL, AUTONOMOUS, ASYNCHRONOUS, ELECTRIC DRIVE, INVERTER, ALGORITHM, CONTROL, RESEARCH, SIMULINK

					141.c5128.12.MД			
		№ of doc.	Sign.					
Devel.	Y.Fedoros				<i>Autonomous photovoltaic pumping station</i> <i>SUMMARY</i>	L.	Page	Pages
Checked	V.Teriaiev						6	111
						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA		
N. Contr.	S. Burian							
Approved.	S Peresada							

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ.....	13
1.1 Огляд автономних систем енергопостачання	13
1.2 Огляд гібридних систем енергопостачання	15
1.3 Особливості керування та моделювання автономних систем.....	21
1.3.1 Фотоелектрична ефективність та відстеження максимальної потужності	21
1.3.2 Відстеження максимальної точки потужності (MPPT)	24
1.3.3 Динамічна реакція	26
1.3.4 Похибка оцінки продуктивності	26
1.3.5 Ефективність відстеження	26
1.4 Класифікація алгоритмів MPPT	27
1.4.1 Метод узгодження навантаження на PV	28
1.4.2 Метод перемикавання навантаження	28
1.4.3 Метод постійної напруги (CV).....	29
1.4.4 Алгоритм збурень та спостережень (P&O).....	30
1.4.5 Комбінований P&O з методом MPPT постійної напруги (CV) 31	
1.4.6 Удосконалений алгоритм dP-P&O.....	31
1.4.7 Оптимізований алгоритм P&O (OP&O)	33
1.4.8 Модифікований метод збурень та спостережень (MOP&O)...	33
2 ОПИС АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ... 35	
2.1 Опис досліджуваної системи	35
2.2 Постановка задачі	38
2.3 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації	38

2.3.1	Вимоги до комплексу розв'язуваних завдань	39
2.3.2	Вимоги до перехідних процесів	40
2.3.3	Вимоги щодо безпеки.....	40
2.3.4	Вимоги до ергономіки та технічної естетики	41
2.3.5	Вимоги щодо експлуатації системи.....	41
2.3.6	Вимоги щодо економічної доцільності	41
3	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	43
3.1	Розрахунок потужності насосу	43
3.2	Вибір силового обладнання	45
3.3	Розрахунок номінальних даних двигуна	47
3.4	Розрахунок Г-подібної схеми заміщення	49
4	СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	53
5	РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОПАНЕЛІ	59
5.1	Розробка алгоритму керування фотопанелі	59
5.2	Представлення фотопанелі	60
5.2.1	Ідеальна схема з одним діодом.....	60
5.2.2	Практична схема з послідовним опором.....	62
5.2.3	Практична схема з послідовними та паралельними опорами .	62
5.3	Визначення параметрів.....	63
5.3.1	Визначення I_{ph}	64
5.3.2	Визначення I_0	64
5.3.3	Визначення R_p та R_s	66
5.4	Моделювання фотопанелі	67
5.5	Криві та інтерполяція	70
6	ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	76

6.1	Перехідні процеси при номінальній вхідній напрузі	78
6.2	Перехідні процеси при зниженні вхідної напруги	80
7	ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	83
7.1	Розрахунок ланки постійного струму	83
7.2	Розрахунок автономного інвертора	84
7.3	Розрахунок драйверів керування ключами	84
7.4	Розрахунок давачів струму	86
7.5	Вибір давача швидкості.....	87
7.6	Вибір обладнання для автоматизації	88
8	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	90
8.1	Аналіз проекту.....	90
8.1.1	Організація стартап-проекту	90
8.1.2	Мета розробки плану.....	90
8.1.3	Аналіз ринку збуту	90
8.1.4	Тарифи на електроенергію.....	91
8.1.5	Організаційно-правовий план	91
8.1.6	Екологічна довідка	92
8.1.7	Розрахунок техніко-економічних показників.....	92
8.1.8	Поточні річні витрати на експлуатацію	93
8.1.9	Фінансово-економічна ефективність інвестицій.....	94
8.2	Економічне обґрунтування технічних рішень	97
8.2.1	Оцінювання ринку	98
8.2.2	Розробка ринкової стратегії.....	100
8.2.3	Розробка маркетингової програми стартап-проекту.....	101
	ВИСНОВКИ.....	102

ВСТУП

Актуальність роботи. Одною із головних потреб людства є вода. Більшість людських видів діяльності покладаються на вільний доступ до відповідних запасів води для забезпечення виробництва продуктів харчування, побутових потреб, охорони здоров'я, вироблення електроенергії та відновлення екосистеми. Усе суспільство потребує воду для сталого соціального та економічного розвитку.

Водопостачання протягом всієї історії було актуальним технічним завданням. Існує велика та нагальна потреба у стабільному забезпеченні водою в бідних, посушливих, сільських регіонах. Автономні системи генерації електроенергії та системи водопостачання на їх основі є оптимальним рішенням цієї проблеми в майбутньому.

Для зрошення сільськогосподарських культур, для перекачування води, яка використовується для побутового використання, а також для водою худоби потрібна насосна система з відповідним джерелом живлення. У сільських районах джерела енергії можуть знаходитися на довгій відстані від джерел води. В той же час монтаж нових ліній електропередачі та трансформаторів в ізольованих місцях є надзвичайно дорогим. На даний час існує багато джерел електроенергії на основі двигунів внутрішнього згоряння, які використовуються в тому числі і для автономних систем насосного водопостачання. Такі системи характеризуються рядом переваг: портативність та простота установки, незалежність від наявності інфраструктури, але мають і недоліки, а саме: потреба обслуговування та дозаправки, висока вартість пального, негативний вплив на навколишнє середовище. Тому використання відновлюваної енергії є особливо привабливим для автономних систем перекачування води у сільській та пустельній місцевості багатьох країн.

Генерування електричної енергії за допомогою фотоелементів є саме тим відновлювальним джерелом, перевагами якого для систем водопостачання є: відносна легкість, низькі інфраструктурні вимоги,

стабільність, безшумність через відсутність обертових машин та турбін, можливість застосування безпосередньо в місці використання, простота монтажу, невелике регулярне обслуговування.

Використання автономних фотоелектричних водяних насосних систем має сприяти покращенню умов життя у віддалених районах та підтриманню чистоти навколишнього середовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» відповідно до одного з наукових напрямків робіт кафедри і погоджена з планом підготовки магістрів.

Мета роботи і задачі досліджень. Метою магістерської роботи є розробка автономної фотоелектричної насосної станції широкого призначення (водопостачання, зрошення, дренажування). В ході виконання роботи передбачається побудова концепції проекту, визначення параметрів, що підлягають контролю, регулюванню та сигналізації; розробка фотоелектростанції в цілому, що включає вибір пристроїв і засобів контролю та регулювання, які дозволяють управляти ходом робочого процесу, дослідження роботи електромеханічної системи.

Автоматизація фотоелектричної станції сприятиме поліпшенню умов праці, економії енергії, матеріалів, підвищенню продуктивності виробництва.

Об'єкт дослідження. Процеси електромеханічного перетворення енергії в автономних фотоелектричних насосних системах.

Предмет дослідження. Автоматизований електропривод автономної фотоелектричної насосної станції.

Методи досліджень. У роботі використані фундаментальні положення теорії електроприводу, теорії автоматичного керування, проектування систем електроприводів, інтелектуального керування, дослідження системи шляхом

моделювання при використанні пакету прикладних програм MATLAB/Simulink.

Наукова новизна. Отримано подальший розвиток автономних фотоелектричних насосних станції з використанням певних алгоритмів керування для відстеження максимальної потужності фотопанелі.

Створено модель автономного фотоелектронасосу із вбудованим слідкуючим електроприводом положення фотопанелі.

Практична цінність. Дослідження автономних фотоелектронасосних установок дозволяють істотно знизити втрати енергії, забезпечити зменшення викидів хімічних речовин в атмосферу за рахунок використання відновлюваних джерел енергії та підвищити техніко-економічні показники комплексу водопостачання в цілому.

Публікації.

1. Теряєв В.І., Федорос Ю.М. Взаємозв'язана система електроприводів автономної фотоелектричної насосної станції. Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2020)», Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/10442>
2. Теряєв В.І., Федорос Ю.М. Взаємозв'язана система електроприводів автономної фотоелектричної насосної станції. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. Київ, 2020.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

1.1 Огляд автономних систем енергопостачання

В наш час потреби людства в енергії невинно ростуть. Однак, вже в найближчі десятиріччя виробники енергії зіткнуться з нестачею природного палива (нафти, газу, вугілля), а також з такими проблемами, як катастрофічне забруднення навколишнього середовища, до якого приводить спалювання цього палива, а також потенційна небезпека ядерної енергетики. Отже, постає необхідність одержання дешевої енергії з використанням відновлювальних джерел живлення при мінімальному впливі на навколишнє середовище [2]. Тому вже зараз широкого розвитку набуває так звана «нетрадиційна» або «чиста» енергетика, яка використовує практично невичерпні ресурси [3].

Ефективним засобом для забезпечення надійного і якісного електропостачання відповідальних споживачів є розробка і впровадження автономних (безперебійних) систем електропостачання (АСЕ), що містять кілька джерел електроенергії, як правило, основний, резервні джерела і аварійні. Крім того, обмежений ресурс органічного палива і негативні екологічні наслідки традиційної енергетики розкривають широкі перспективи для використання в складі АСЕ відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Одною з таких автономних систем є фотоелектрична система енергопостачання. Вона складається з взаємопов'язаних компонентів, розроблених таким чином, щоб досягти конкретної мети доставки бажаної електроенергії від невеликого пристрою до мережі навантаження.

Системи енергопостачання класифікуються на три категорії: з підключенням до мережі, автономні та гібридні. Включають в себе різні

джерела енергії, такі як фото панелі, дизельні генератори та вітрогенератори. У підключених до мережі та автономних системах можуть бути використані елементи зберігання, такі як батареї або суперконденсатори, щоб зберігати енергію на нічний час, коли буде недостатньо сонячного світла [4].

Потужність фото панелі в автономній системі безпосередньо подається на навантаження без підключення до утиліти. Автономна система вважається одним з найбільш економічних способів впровадження фотоелектричної системи, особливо для застосування в сільській місцевості, що мають великі періоди інтенсивного сонячного випромінювання та не мають доступу до основної комунальної мережі. Прикладами є системи зв'язку, водо-насосні системи, маяки та аварійні служби або військові об'єкти, де потрібні допоміжні енергоблоки.

Але такі системи мають деякі недоліки, такі як елементи накопичувача з низьким коефіцієнтом ємності, акумуляторні батареї з обмеженою ємністю, що призводи до розсіювання та витрачання надлишкової енергії. Автономні системи мають наступні важливі особливості [5]:

- оскільки система не підключена до комунальної мережі, необхідний накопичувальний елемент, що призводить до додаткових витрат на акумулятор та накопичувач, інакше генеровану потужність доводиться розсіювати.
- у автономних системах експлуатаційна потужність повинна відповідати максимальній потребі в навантаженні.

Характер графіків електроспоживання та енергетичного потенціалу ВДЕ є змінним, тому до основного обладнання автономної системи електропостачання слід додати пристрій, який здатний накопичувати електричну енергію. Така структура автономних сонячних та вітрових електростанцій представлена на рис. 1.1.

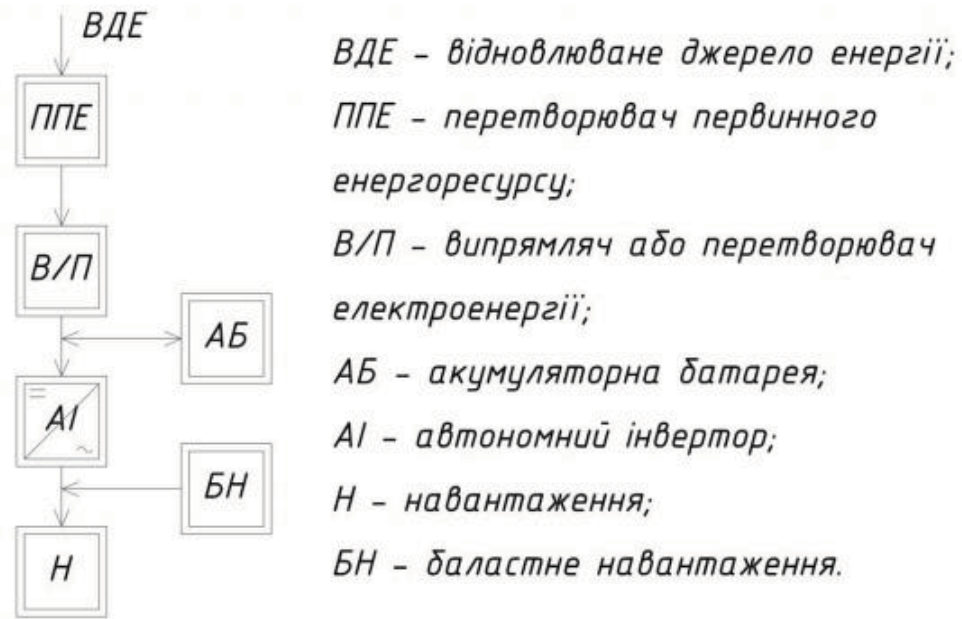


Рисунок 1.1 – Автономна система електропостачання з ВДЕ

Джерелом живлення наведеної вище схеми є акумуляторні батареї, які взаємодіють з автономним інвертором, у якому потужність накопичувача підбирається під пікову потужність навантаження. За рахунок позитивного енергетичного балансу накопичувача визначається значення середньої потужності навантаження на конкретному часовому інтервалі, коли енергія накопичувача, яка отримана з ВДЕ, є вищою від енергії, яку віддано в навантаження з врахуванням ККД і раціональних режимів роботи обладнання. Баластне навантаження приймає надлишки електричної енергії, яка не споживаються акумуляторною батареєю і навантаженням в поточний інтервал часу [6].

1.2 Огляд гібридних систем енергопостачання

На даний час доведено, що гібридні системи електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії є економічно обґрунтованим рішенням проблеми електрифікації не тільки в сільській місцевості, а також в інших районах, де мережа централізованого електропостачання видалена, ненадійна або її прокладка дорога, і навіть в великих містах. Все це пов'язано

з підняттям цін на газ і інші джерела опалення домів. Можна приводити приклади таких міст, як Берлін і інші, де люди з початку 2000 років масово почали встановлювати фотоелектричні системи для своїх власних потреб.

У більшості випадків при побудові фотоелектричних систем використовується конфігурація із з'єднанням різних джерел енергії на стороні постійного струму. Проте останнім часом, після появи надійних і відносно дешевих моделей мережевих інверторів, які використовують мікропроцесори, а в більшій степені 8- і 16-розрядні мікроконтролери, застосовують з'єднання різних джерел енергії змінного струму. Це забезпечує не тільки більшу гнучкість, але і високу ефективність використання енергії різних джерел за рахунок зменшення втрат в системі.

На даний момент у світі здійснюються певні зміни в формуванні енергетичної політики держав, а саме: відбувається перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектору з неефективними мережами, великими виробниками, викопним паливом, конкуренцією на ринках вугілля, природного газу, електроенергії – до іншої, нової, моделі, яка стає більш конкурентоспроможною, вирівнюються можливості для розвитку, а також зменшується домінування одного з видів виробництва енергії чи джерел і шляхів для постачання полива. Згідно з цим надається перевага щодо використання енергії за рахунок відновлювальних і альтернативних джерел енергії для підвищення енергоефективності.

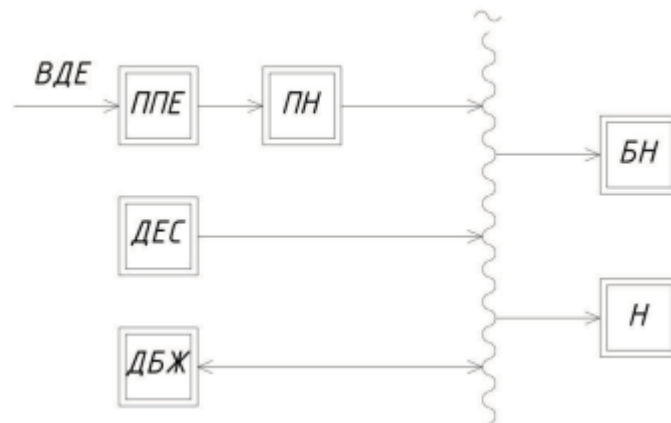
Резервне електропостачання є також досить актуальним в умовах зносу загальних електромереж, так як відключення електроенергії, навіть на короткий проміжок часу може призвести до великих втрат. Слід звернути увагу на те, що параметри якості електричної енергії, яку виробляють автономні електрогенератори стоять на одному, іноді і вищому рівні ніж електроенергія в централізованих мережах. Це доволі важливий фактор для об'єктів, які оснащені обладнанням, чутливим до якості електричної енергії.

Участь відновлюваної енергетики, як електрообладнання в електрифікації об'єкта, залежить від певних складових, основними з яких є:

потреби об'єкта в енергії і потужності, економічні показники, енергетичний потенціал відновлюваного джерела енергії та його зміна в часі, вимоги до надійності електропостачання. За рахунок цих та інших чинників відбувається вибір структури та складу автономної системи електропостачання об'єкта.

За будовою сучасні електроустановки для автономних систем електропостачання можуть бути на основі сонячних електростанцій і автономних вітрових або на основі поєднаного, гібридного, використання дизельної електростанції з електроустановкою відновлюваної енергетики. Якщо розглядати варіант спільного використання, то дизельна генерація енергії реалізується як резервне джерело живлення або для спільної роботи з електроустановками, джерелом енергії яких є ВДЕ [7].

Слід звернути увагу на те, що забезпечення неперервного електропостачання для потужних споживачів за рахунок тільки ВДЕ є неможливим, так як сезонні зміни графіків енергоспоживання не в змозі відповідати добовим змінам потенціалу сонячного випромінювання та вітру. Отже спільна робота, поєднання нестабільного, але поновлюваного джерела електроенергії (ВДЕ) з сталим дає змогу побудови універсальних електричних систем, які зможуть надійно забезпечувати електропостачанням різні децентралізовані об'єкти, а також матимуть високі техніко-економічні характеристики. Узагальнену схему гібридної системи електропостачання зображено на рис. 1.2.



*ВДЕ – відновлюване джерело енергії;
 ДЕС – дизельна електростанція;
 ППЕ – перетворювач первинного енергоресурсу;
 ПН – перетворювач напруги;
 ДБЖ – джерело безперебійного живлення;
 Н – навантаження;
 БН – баластне навантаження.*

Рисунок 1.2 – Гібридна енергетична система з ДЕС

При високому потенціалі відновлюваного джерела енергії, дизельний генератор вимикається. Генерація і коливання при споживанні електричної енергії від ВДЕ згладжується за рахунок запасу енергії в акумуляторах джерела безперебійного живлення (ДБЖ), це дозволяє істотно зменшити число включень дизельної електростанції (ДЕС).

Під час роздільної роботи ППЕ відновлюваного джерела енергії повинен мати достатню встановлену потужність. Оскільки миттєва потужність сонячних чи вітрових електростанцій може перевищувати номінальне значення навантаження, то передбачається використання баластного навантаження (БН) для утилізації надлишкової електроенергії.

В загальному балансі, наведеної вище системи електропостачання, частка електроенергії виробленої ВДЕ повинна становити не менше 50%, так як при менших значеннях встановленої потужності установок ВДЕ зростає навантаження на ДЕС. Менше значення призводить до зростання тривалості

режиму генерації перетворювача первинного енергоресурсу (ППЕ), це свідчить про те, що ВДЕ виробляє менше енергії, ніж потрібно і вказує на доцільність паралельного режиму роботи поновлюваної та паливної складової системи електропостачання. Звідси виникають проблеми в реалізації такого режиму, так як ускладняється сам алгоритм керування енергетичною системою за рахунок введення в її склад додаткових компонентів, а саме: пристрою синхронізації та універсального інвертора, який здатен працювати як автономно так і паралельно з електричною мережею [8]. Структура даного комплексу зображена на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Гібридний енергетичний комплекс з інверторною ДЕС та ланкою змінного струму

В таких системах функції перетворювача напруги (ПН) виконують випрямно-інверторні перетворювачі частоти. Такі перетворювачі є складовою сучасних вітрових електростанцій. Ця властивість і генерація електроенергії фотоелектричними модулями постійного струму, дають

можливість об'єднати енергоджерела гібридної системи в ланці постійного струму, як зображено на рис. 1.4.

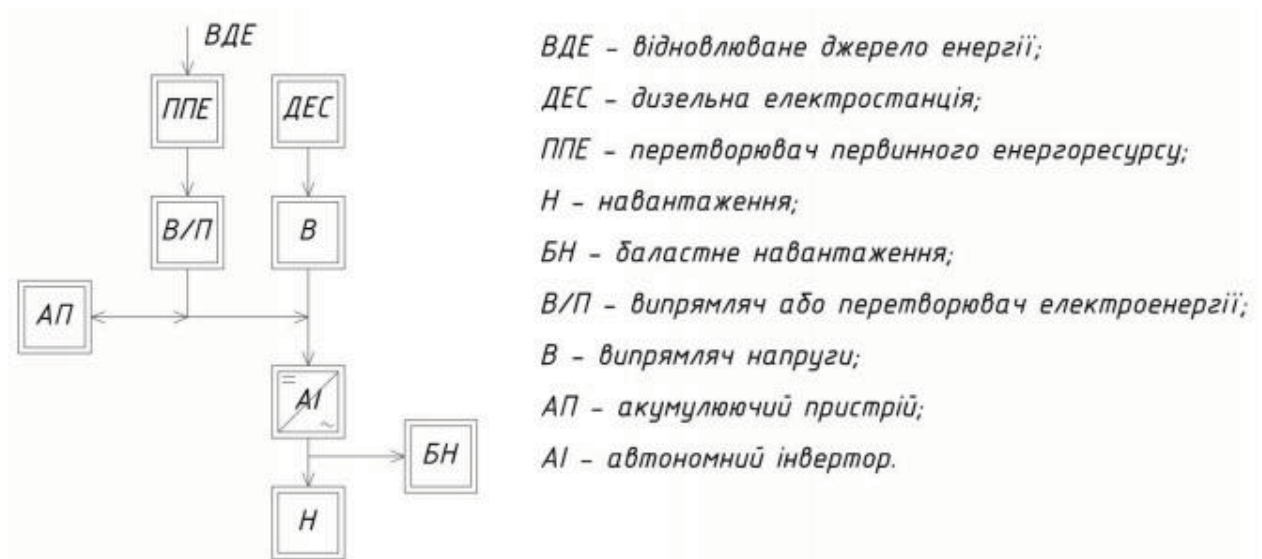


Рисунок 1.4 – Гібридний енергетичний комплекс з ланкою постійного струму

Використання ланки змінного струму є перевагою при побудові системи з розподіленою генерацією, при інтеграції енергоустановок відновлюваних джерел енергії у вже існуючі системи електропостачання [9].

Розглянемо гібридну енергетичну систему з постійно діючою ДЕС, яка, як і попередні системи, складається з ДЕС і установок відновлюваної енергетики. Дані установки спільно працюють на електричну мережу, яка утворена дизельною електростанцією. В даному випадку ДЕС є головним джерелом електроенергії, а установки з ВДЕ слугують для економії значної частини палива [10].

Умови надійності і стійкості системи електропостачання слугує співвідношення потужності ДЕС та мережних інверторів вітро- чи фотоелектростанцій є такими, щоб миттєва потужність від ВДЕ не перевищувала 40 – 50% потужності від ДЕС; структура даного комплексу зображена на рис. 1.5.

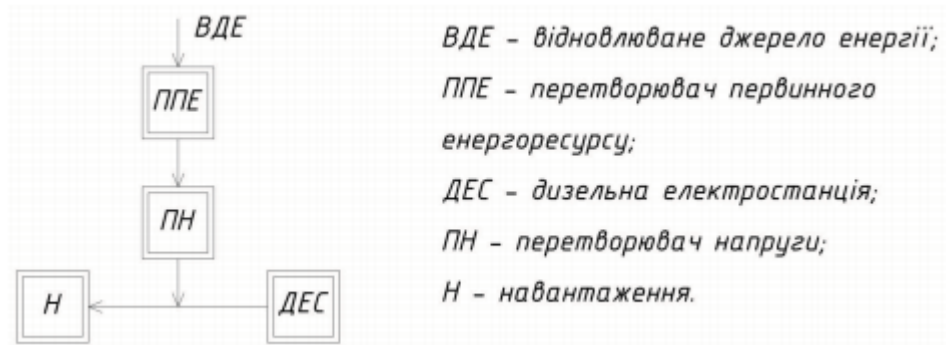


Рисунок 1.5 – Гібридна енергетична система з постійно діючою ДЕС

Перевагою таких систем є простота, яка впливає на зниження початкового капіталовкладення, а також зменшення частки обслуговування обладнання.

Незначний обсяг заміщення генерації дизелю є головним недоліком схожих систем.

1.3 Особливості керування та моделювання автономних систем

1.3.1 Фотоелектрична ефективність та відстеження максимальної потужності

Хоча фотоелектричні панелі можуть здаватися хорошим джерелом електроенергії, ефективність їх перетворення не дуже висока. Їх здатність перетворювати енергію сонячного світла в електричну потужність порівняно недосконала, ефективність перетворення зазвичай становить в межах 12 ~ 20%. Діапазон ефективності може ще більше знизитися під час змінного сонячного опромінення, температури панелі та умов навантаження [11]. Тому, якщо навантаження безпосередньо пов'язане з фотопанеллю (PV-масивом), він, як правило, повинен бути великим, щоб подати необхідну потужність навантаження. Це призводить до надмірної вартості системи. Важливо керувати PV-елементами масиву в точці максимальної потужності (MPP) або якомога ближче до неї, використовуючи електронну схему

відповідності навантаженню, оскільки це дає покращення наявної потужності порівняно з підключенням навантаження напряму [12]. Вихідний струм і потужність PV-масиву залежить від напруги. Крім того, наявна вихідна потужність фотоелектричного масиву коливається зі зміною температури навколишнього середовища та сонячного опромінення. Тому робоча точка більшості двигунів і насосних систем постійного струму при різних рівнях сонячної радіації була б далекою від MPP PV-масиву. Слідкувати за точним MPP з різними умовами джерела та навантаження є завданням через нелінійну характеристику напруги струму для PV-масиву. Загальна вартість системи може бути зменшена, а робота можлива при підвищенні ефективності та потужності вихідної потужності, якщо сонячна панель постійно використовується для отримання максимальної кількості енергії протягом денного часу, гарантуючи, що панель завжди працює в оптимальних умовах подачі електроенергії; Навпаки, відповідність імпедансу дозволяє отримати максимальну потужність із джерела напруги із помітним внутрішнім опором. Для цього використовуються електронні системи відстеження максимальної потужності (MPPT). Типова система MPPT складається з перетворювача потужності в режимі комутації, вставленого між джерелом PV та навантаженням, а коефіцієнт зарядності перетворювача регулюється алгоритмом управління для забезпечення відстеження MPP [13]. Різні дослідники та проектувальники проводили велику кількість науково-дослідних робіт, щоб дослідити перетворювач потужності та методи управління для відстеження MPP фотоелектричного модуля. Існує ряд методів, але жоден з них не перевершує інших у всіх відношеннях [13, 14-16].

В останні роки в літературі було представлено багато різних методик або алгоритмів автоматичної ідентифікації та здійснення керування приблизно на максимальній точці потужності. Ці методи відрізняються за складністю, вартістю, діапазоном ефективності, апаратною реалізацією, популярністю, швидкістю та іншими аспектами. У [17, 18] проаналізовано і

порівняно щонайменше дев'ятнадцять різних методик, щоб визначити їх переваги та недоліки. Вони узагальнені в таблиці продуктивності як корисний посібник для вибору відповідного методу MPPT для конкретної системи ПВ. Методи відстеження точки максимальної потужності можуть бути класифіковані як додаткова електропровідність (IncCond) [14], дробовий струм короткого замикання [15], дробова напруга відкритого ланцюга [16], максимізація напруги струму навантаження, контроль кореляції пульсацій, сходження на гірку або збурення спостерігача (P&O) [15], нейронну мережу [19], нечітке логічне управління та інші методи MPPT [17, 20]. Поки що метод P&O є найбільш часто використовуваною методикою на практиці, завдяки простоті впровадження в контролер з низькими витратами, і він має порівняно хороші показники відстеження MPP порівняно з іншими методами. Тим не менш, метод P&O не вдається ефективно відстежувати MPP, коли радіаційні та температурні умови швидко змінюються. Алгоритм також коливається навколо MPP або поблизу нього, коли умови повільно змінюються або є постійними. Отже, частина наявної енергії витрачається даремно [21].

Багато авторів запропонували різні вдосконалення базового алгоритму P&O [22-27]. Наприклад, метод збільшення коефіцієнта провідності використовується для подолання коливань шляхом порівняння поступової та миттєвої провідності PV-масиву. Однак вимоги до системи управління є більш складними та становлять значну вартість для всієї системи [28]. Методи дробового струму короткого замикання та дробові напруги відкритого ланцюга прості, але обидва методи мають однакові недоліки. До них відносяться помилки через наближення лінеаризації та втрати потужності, спричинені додатковими заходами та необхідністю короткого замикання або відкритого замикання на PV-масив на короткий період [17].

Типова автономна енергосистема MPPT-PV включає в себе модулі фотоелектричного масиву, навантаження та зменшення (Buck) перемикач перетворювача постійного струму, що виконує функцію інтерфейсу

живлення між PV-масивом та навантаженням, як показано на рис. 1.6. Система буде використовуватися для перевірки працездатності запропонованих методів MPPT з двома типами навантаження.

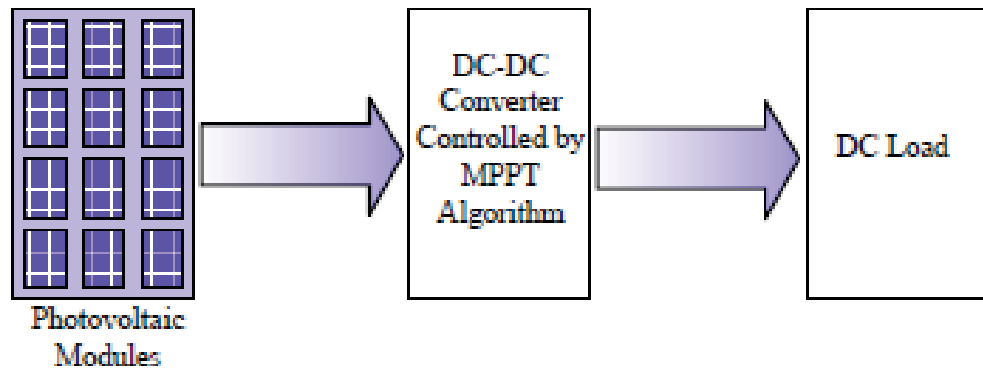


Рисунок 1.6 - Структурна схема запропонованої системи MPPT-PV

Перший алгоритм називається модифікованим методом збурень та спостережень (MP&O). Другий та третій методи передбачають нечітку логіку та нейронну мережу на базі MPPT PV - водяної насосної системи.

1.3.2 Відстеження максимальної точки потужності (MPPT)

Для генерації фотоелектричних батарей дуже важливо керувати системою з високою ефективністю енергоспоживання, забезпечуючи, що система завжди працює в точці максимальної потужності незалежно від змін навантаження та погодних умов. Іншими словами, перенесення максимальної потужності на навантаження, зіставивши вихідний опір з навантаженням. Для підтвердження цього було запропоновано систему MPPT, яка дає змогу подавати максимальну потужність під час роботи сонячного масиву і яка відстежує коливання максимальної потужності, викликані змінами атмосферних умов. Система MPPT - це в основному електронний пристрій, вставлений між масивом PV та навантаженням. Цей пристрій містить два основних компоненти, як показано на рис. 1.7. Перетворювач потужності перемикання постійного струму разом з алгоритмом управління MPPT для

роботи системи PV таким чином, що він може передавати максимально можливу потужність навантаження.

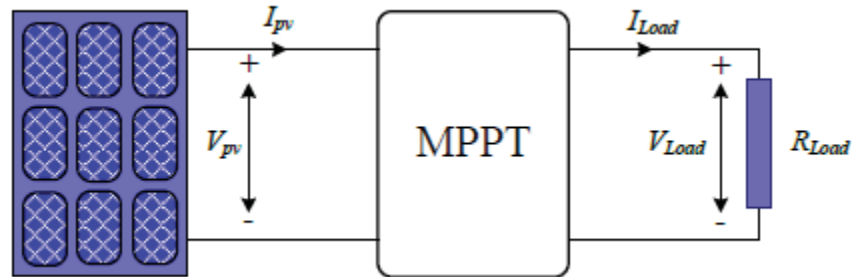


Рисунок 1.7 – Перетворювач, який виконує функцію відстеження максимальної потужності

Коли сонячна панель видає енергію, її максимальна вироблена потужність змінюється в залежності від атмосферних умов (сонячного випромінювання та температури), а електрична характеристика навантаження також може змінюватися. Таким чином, внутрішній опір PV масиву нечасто відповідає імпедансу навантаження. Для забезпечення оптимального використання наявної сонячної енергії вкрай важливо керувати системою генерації фотоелектричних джерел на MPP або поблизу неї. Основна мета MPPT полягає в узгодженні цих двох параметрів шляхом регулювання коефіцієнта корисної дії перетворювача потужності. Оскільки розташування MPP на кривій I-V змінюється непередбачувано, його не можна заздалегідь визначити через зміни радіації та температури PV панелі. Відповідно, для визначення цього пункту необхідне використання алгоритму MPPT або розрахункової моделі [29].

Існує кілька методів відстеження MPP фотоелектричної системи, які були ретельно вивчені, розроблені та опубліковані протягом останніх десятиліть. Між методами є різниця в простоті, вимогам до сенсора, вартості, діапазону ефективності, швидкості конвергенції та апаратної реалізації. Деякі алгоритми MPPT перевершують інші в тих же умовах роботи. Огляд та аналіз

декількох методів МРРТ були проведені в [21, 29] для кількісної оцінки продуктивності кожного алгоритму управління порівняно з іншими.

Слід зазначити, що для успішної побудови конструкції слід оцінювати динамічну реакцію, ефективність відстеження і стійку похибку при оцінці продуктивності нових чи модифікованих алгоритмів управління МРРТ [35].

1.3.3 Динамічна реакція

Алгоритм управління МРРТ повинен забезпечувати швидке відстеження МРР під час швидких змін атмосферних умов (сонячного опромінення і температури). Чим вища швидкість відстеження алгоритму МРРТ, тим менші втрати сонячної енергії в системі.

1.3.4 Похибка оцінки продуктивності

Алгоритм управління МРРТ повинен припинити відстеження, як тільки МРР знаходиться, і повинен змусити систему підтримувати роботу в цій оптимальній робочій точці якомога довше. Однак цього практично неможливо досягти в реальній системі МРРТ через активний процес збурень в алгоритмах МРРТ з фіксованим розміром кроку відстеження та безперервним коливанням сонячної інсоляції та температури. Це явище негативно впливає на ефективність системи PV.

1.3.5 Ефективність відстеження

Визначення ефективності відстеження є дуже важливим кроком для кількісної оцінки того, наскільки успішно алгоритм управління МРРТ відстежує МРР і якою мірою сприяє підвищенню загальної продуктивності системи PV порівняно з іншими методами.

Відповідно до [14] ефективність відстеження визначається як відношення між фактичною потужністю ПВ-масиву та теоретичною потужністю за той самий проміжок часу. Атмосферні умови (опромінення та температура) змінюються і змінюються в широкому діапазоні. Отже, кожен

алгоритм МРРТ повинен бути оцінений у діапазоні різних робочих умов при порівнянні продуктивності алгоритму МРРТ. Добре розроблена система управління МРРТ повинна забезпечувати хороші показники роботи в різних атмосферних умовах. Рівняння (1.1) використовується в змодельованій системі VP для обчислення ефективності відстеження [36].

$$\eta_{\text{МРРТ}} = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{P_{\text{actual},i}}{P_{\text{max},i}}, \quad (1.1)$$

де P_{actual} - це i -й зразок реальної вимірної потужності, вироблений PV-масивом при використанні керування МРРТ, P_{max} - це i -та вибірка справжньої максимальної потужності масиву PV, яка могла б вироблятися за рахунок сонячного опромінення та температури, n – це загальна кількість зразків.

1.4 Класифікація алгоритмів МРРТ

За останні роки для систем електроживлення з PV запропоновано кілька алгоритмів МРРТ, щоб знайти МРР та підвищити ефективність системи. Алгоритми МРРТ можуть бути розділені на два типи, які є непрямым керуванням або «технікою квазівідстеження» та прямим керуванням або «справжніми методами відстеження» [19, 34]. У методах непрямого керування МРР обчислюється або шляхом вимірювання напруги та струму PV-масиву, сонячної інсоляції, або за допомогою використання математичних функцій, отриманих з емпіричних даних. Отже, ці методи не здатні відстежувати МРР з різним опроміненням і температурою. Методами непрямого керування є методика пошуку таблиці, техніка постійної напруги, дробова напруга відкритого контуру та дробовий струм короткого замикання. Однак справжні методи відстеження мають можливість знаходити оптимальну робочу точку навіть у мінливих атмосферних умовах, оскільки вони не покладаються на попередні знання або обчислені дані з характеристик PV масиву V-I. Справжніми методами відстеження є техніка збурень та спостережень (P&O), техніка нарощення провідності (INC); але до

цієї категорії також можуть бути включені методи штучного інтелекту, такі як методи нечіткого логічного управління (FLC) та методи нейронної мережі. У процесі відстеження використовується одна або дві змінні для обчислення MPP. Для дробової напруги відкритого контуру та струму дробового короткого замикання використовується лише одна змінна, або вихідна напруга масиву ПВ, або струм відповідно, хоча методи P&O та INC потребують обох змінних для визначення MPP [19, 37].

1.4.1 Метод узгодження навантаження на PV

Проста техніка узгодження навантаження на панелі - це одна з найпростіших методик для управління PV-масивом, близьким до його максимальної точки потужності. У цій техніці оптимальна робоча точка PV-масиву визначається або серією вимірювань при середніх умовах експлуатації, або теоретичним розрахунком. Навантаження застосовують для отримання значень напруги та струму PV, що відповідають MPP. Існує ще один поширений простий метод, який широко застосовується в усьому світі в системах зарядного пристрою для фотоелектричних батарей, який передбачає вибір середньої напруги акумулятора, близької до середньої VMPP сонячної панелі [38]. Цей метод має переваги простоти, і додаткові схеми не використовуються, тому втрати потужності між панеллю та акумулятором знижуються, а ризик відмови компонентів залишається низьким для всієї системи. Однак система не враховує зміни сонячного опромінення чи температури.

1.4.2 Метод перемикавання навантаження

Метод перемикавання навантаження було запропоновано в 1993 році Хуан Йонджі та Ліном Дехенгом для оптимізації вихідної потужності, виробленої фото панеллю. Метод MPPT заснований на використанні контролера для реконфігурації масиву [39]. У цій конфігурації різні панелі

з'єднані послідовно та паралельно відповідним чином, щоб утворити PV масив. Потім PV-масив підключається до декількох керованих керуючих батарей, послідовно з'єднаних для виконання процесу відповідності навантаженню, як показано на рис. 1.8.

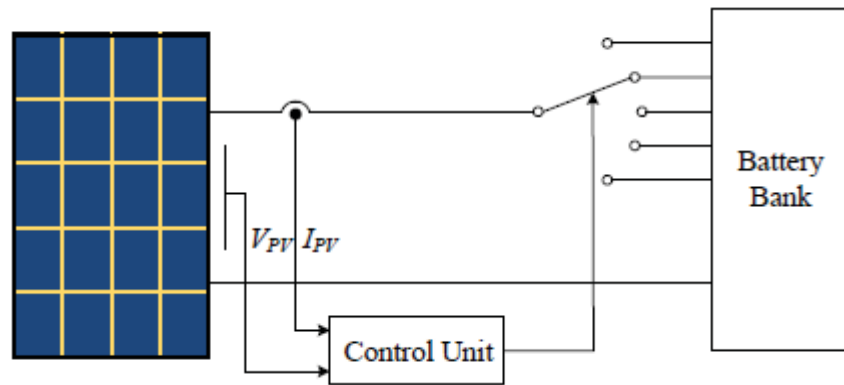


Рисунок 1.8 – Блок-схема методу перемикавання навантаження

Група акумуляторів використовується для зберігання енергії, виробленої PV. Блок управління в режимі реального часу визначає вихід сонячного масиву, з'ясовує оптимальну робочу точку і підтримує роботу максимально наближеною до цього, шляхом перемикавання з'єднання акумулятора. Однак у цього методу є недоліки, він потребує додаткові схеми комутації та проводку, а ступінчаста комутація робочої напруги не може гарантувати точного відстеження MPP. Крім того, важко тримати рівний рівень заряду у всіх батареях, отже, погіршуючи термін служби акумулятора в довгостроковій перспективі [38].

1.4.3 Метод постійної напруги (CV)

Якщо система PV реалізована без акумулятора для прив'язки напруги ланки до приблизно постійного рівня, може застосовуватися проста схема управління методом постійної напруги, як представлено в [22]. У цьому способі зворотний зв'язок напруги PV порівнюється з фіксованою опорною напругою, і отриманий сигнал регулює коефіцієнт напруги перетворювача

DC-DC для збереження робочої точки PV-масиву на MPP або близько до нього, як показано на рис. 1.9. Опорна напруга встановлюється рівною VMPP характерного PV масиву або іншому обчисленому найкращому значенню фіксованої напруги.

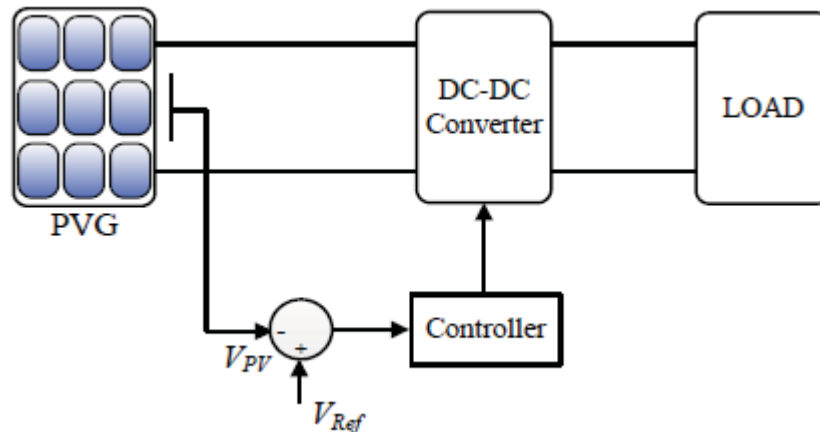


Рисунок 1.9 - Метод MPPT зворотного зв'язку за напругою з постійною опорною напругою

Цей метод простий, економічний і потрібно лише одне управління зворотним зв'язком. Однак ця методика має той недолік, що вона не виправляє такі зміни в навколишньому середовищі, як зміна опромінення та температури.

1.4.4 Алгоритм збурень та спостережень (P&O)

Алгоритм збурень і спостережень вважається найпоширенішим алгоритмом MPPT серед інших методик через його просту структуру та простоту реалізації. Він заснований на концепції, що на кривій потужності, зміна напруги вихідної потужності масиву PV дорівнює нулю ($\Delta P_{PV} = 0$) у верхній частині кривої. P&O функціонує періодично збурюючи (збільшуючи або зменшуючи) напругу або струм кінцевого масиву PV і порівнюючи відповідну вихідну потужність PV масиву $P(n+1)$ з потужністю в попередньому збуренні $P(n)$. Якщо збурення в кінцевій напрузі призводить до збільшення потужності PV ($\Delta P_{PV} > 0$), збурення слід тримати в тому ж напрямку, інакше збурення переміщуються в протилежну сторону. Цикл

збурень повторюється до досягнення максимальної потужності при ($\Delta PPV = 0$). Є два різні способи впровадження P&O алгоритм. У звичайному способі опорна напруга використовується як параметр збурення; тому для регулювання коефіцієнта заряду потрібен ПІ-регулятор [23]. Другий спосіб полягає в тому, що потужність вимірюється за кожним циклом ШІМ [15]. Перевагами цієї техніки є простота реалізація, і це не вимагає попереднього знання масиву PV.

Однак P&O не зупинить збурення, коли буде досягнуто MPP, і коливатиметься навколо нього, що призведе до непотрібних втрат електроенергії.

1.4.5 Комбінований P&O з методом MPPT постійної напруги (CV)

При низьких рівнях опромінення звичайний алгоритм збурень і спостережень (P&O) демонструє низьку ефективність. Отже, для подолання обмежень звичайного алгоритму P&O та підвищення продуктивності відстеження на всіх рівнях опромінення автор в [36] запропонував поєднання методу постійної напруги (CV) та модифікованого алгоритму P&O. Алгоритм починає працювати, збільшуючи робочий цикл до тих пір, поки вихідна напруга масиву PV не досягне 76% від напруги VOC у відкритому контурі, що майже близьке до фактичного MPP, і воно не розглянеться як вихідна точка алгоритму. Таким чином, алгоритм може оцінити вихідний струм PV масиву, якщо значення струму нижче 0,7 А, він переключить метод, а якщо значення струму більше 0,7 А перейде до методу P&O.

1.4.6 Удосконалений алгоритм dP-P&O

Звичайний алгоритм P&O має деякі обмеження, такі як коливання навколо MPP в стаціонарному стані, низька швидкість відстеження і навіть плутає та відстежує MPP в неправильному напрямку, коли опромінення швидко змінюється [22]. Дезсо Сіра запропонував просте вдосконалення, яке

називається методом dP-P&O [39]. У цьому способі додається додатковий блок, як показано на рис. 1.10. Додатковий блок здійснює вимірювання потужності в середині періоду відбору проб MRPT без будь-яких збурень.

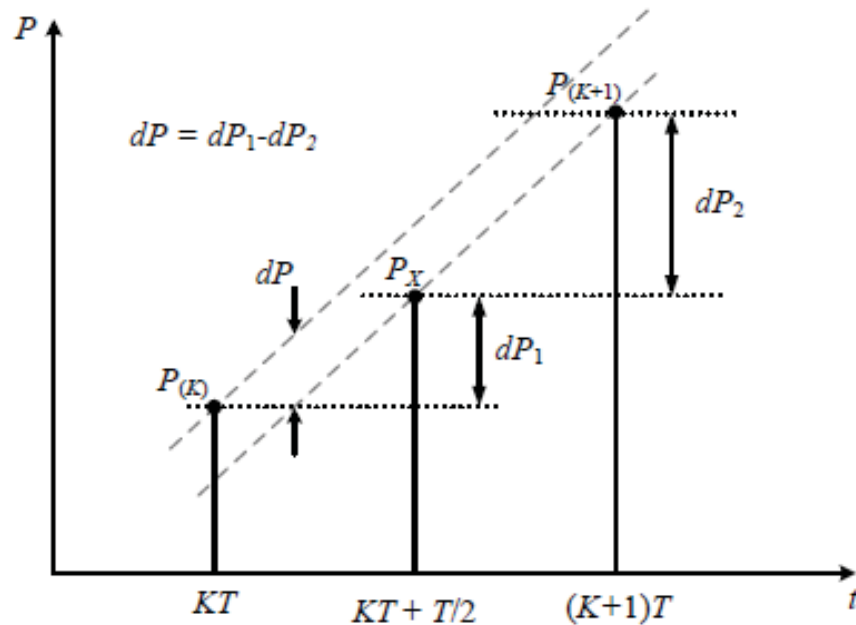


Рисунок 1.10 - Вимірювання потужності між двома екземплярами вибірки MRPT

$$\begin{aligned} dP &= dP_1 - dP_2 = (P_X - P_K) - (P_{K+1} - P_X) \\ &= 2P_X - P_{K+1} - P_K \end{aligned} \quad (1.2)$$

На рис. 1.10 P_K - вимірювання потужності в момент відбору проб K , P_{K+1} - вимірювання потужності в момент відбору проб $(K + 1)$, dP_1 , dP_2 - це зміна потужності, обумовлене збуренням MRPT і за рахунок збільшення опромінення відповідно.

Зміна стану навколишнього середовища може бути показана зміною потужності між P_X і P_{K+1} , що відображається, оскільки MRPT не вжило жодних дій. Зміна стану навколишнього середовища з невеликим збуренням MRPT призведе до зміни потужності dP_1 , що є різницею потужності між P_X і P_K . Отже, припускаючи, що протягом одного періоду вибірки MRPT швидкість зміни в опроміненні постійна, dP , викликане чисто командою

MPPT, може бути обчислено рівнянням (1.2). Продуктивність удосконаленого методу dP-P&O експериментально підтверджена та порівняна зі звичайним алгоритмом P&O. Результати довели, що вдосконалений dP-P&O має здатність відслідковувати MPP у правильному напрямку при різкій зміні опромінення на відміну від звичайних P&O та збільшив швидкість відстеження [27, 39].

1.4.7 Оптимізований алгоритм P&O (OP&O)

Звичайний алгоритм P&O, що працює з фіксованим розміром кроку, коливається навколо MPP, що призводить до втрат деякої кількості доступної енергії [40, 41]. Запропонований метод OP&O полягає в оптимізації параметрів P&O MPPT до динамічної поведінки всієї системи, складеної конкретним перетворювачем та PV-масивом [40].

1.4.8 Модифікований метод збурень та спостережень (MOP&O)

Цей метод був запропонований для зменшення коливань навколо MPP, викликаних звичайним алгоритмом P&O [42]. MOP & O діє, додаючи процес оцінки зміни опромінення у кожен процес збурень, щоб виміряти величину зміни потужності, викликані зміною атмосферного стану. Це було підтверджено моделюванням та експериментальними випробуваннями, які засвідчили, що загальна ефективність MOP & O краща, ніж P&O.

Висновки до розділу

1. В даному пункті було проведено огляд автономних систем енергопостачання, а саме фотоелектричних систем. Наведено їх класифікацію за способом підключення до мережі. Також проаналізовано переваги та недоліки автономних систем енергопостачання.

2. Детально розглянуто автономні системи, в тому числі гібридні. Наведено функціональні схеми систем даного типу, розглянуті їх недоліки і переваги.

3. Проведено аналіз ефективності фотоелектричних панелей, здійснено огляд способів відстеження максимальної потужності енергосистеми. Наведено класифікацію алгоритмів керування.

4. Здійснено огляд методів відстеження максимальної потужності, наведено переваги і недоліки кожного, зроблено порівняння їх між собою.

5. Отримані результати дають змогу здійснити вибір найбільш раціональної електромеханічної системи автономної фотоелектричної станції та алгоритмів керування нею.

2 ОПИС АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Генерування електричної енергії за допомогою фотоелементів є саме таким відновлювальним джерелом, перевагами якого для систем водопостачання є: відносна легкість, низькі інфраструктурні вимоги, стабільність, безшумність через відсутність обертових машин та турбін, можливість застосування безпосередньо в місці використання; простота монтажу, невелике регулярне обслуговування [44].

Використання автономних фотоелектричних водяних насосних систем має сприяти покращенню умов життя у віддалених районах та підтриманню чистоти навколишнього середовища.

2.1 Опис досліджуваної системи

Фотоелектрична система складається з взаємопов'язаних компонентів, розроблених таким чином, щоб досягти конкретної мети доставки бажаної кількості та якості електроенергії від джерела до навантаження. Фотоелектричні системи класифікуються за способом підключення до мережі на автономні та гібридні. Останні включають різні джерела енергії, такі як фотобатареї, дизельні генератори та вітрогенератори. У автономних та підключених до мережі відновлюваних джерелах енергії можуть бути використані елементи зберігання, такі як батареї або суперконденсатори, щоб накопичувати енергію в денний час, коли сонячна радіація максимальна.

Автономні системи вважаються одними з найбільш раціональних для впровадження фотоелектричних станцій, особливо в сільських та віддалених місцевостях, де мають місце великі періоди інтенсивного сонячного випромінювання та відсутній доступ до основної електромережі. Прикладами

є системи зв'язку, водонасосні системи, маяки, аварійні служби та військові об'єкти.

Автономна фотоелектрична система водопостачання привертає все більше уваги за останні 20 років через значні постійні скорочення витрат, досягнуті у виробництві фотопанелей. У фотоелектричних системах широко застосовуються два типи насосів: відцентровий насос і об'ємний насос. Відцентровий насос здатний перекачувати великий об'єм води і працює з відносно високим ККД. Ці насоси використовуються для перекачування води із свердловин та з поверхневих водойм і вони підходять для середніх та високих потреб води. Об'ємні насоси зазвичай використовуються при низьких витратах. Відцентрові насоси, на відмінну від об'ємних, мають експлуатаційні характеристики, які добре узгоджуються властивостям фотопанелей, оскільки їх струм змінюється майже лінійно залежно від сонячного випромінювання [45].

Енергія від сонячних панелей отримується у формі ЕРС постійного струму, що повільно змінюється, тому насоси зазвичай приводяться в дію двигунами постійного струму, щоб мінімізувати складність системи, оскільки вони можуть бути безпосередньо підключені до масиву панелей. Двигуни постійного струму з постійними магнітами (ПМ) не потребують початкового збудження і є більш популярними, ніж двигуни з електромагнітним збудженням. Недоліком щіткових двигунів є те, що вони вимагають технічного обслуговування через знос та засмічення комутатора та ковзних контактів. Безщіткові двигуни постійного струму все частіше використовуються в фотоелектричних насосних системах, оскільки вони мають відносно високий ККД і не вимагають обслуговування, але вартість і складність таких систем будуть значно вищими.

Двигуни змінного струму мають переваги, такі як висока ефективність, відсутність щіток, більш проста та міцна конструкція. Початкова вартість може бути найнижчою у випадку з асинхронним двигуном. Однак детальний аналіз двигунів постійного та змінного струму, що застосовуються для

водопостачання, проведений в [46], показав, що ефективність і динамічні характеристики двигуна постійного струму з ПМ кращі, ніж асинхронного двигуна. Крім того, при використанні двигуна змінного струму потрібен інвертор для перетворення постійного струму фотопанелей в змінний струм. Отже, вартість та складність загальної системи значно збільшуються.

Якщо фотоелектростанція реалізована без акумулятора для прив'язки напруги шини до приблизно постійного рівня, може застосовуватися система стабілізації постійної напруги. В такій системі автоматичного регулювання зворотний зв'язок по напрузі фотопанелі порівнюється з фіксованою опорною напругою і отриманий сигнал регулює коефіцієнт передачі перетворювача DC-DC для збереження робочої точки масиву на MPP або близько до нього [50].

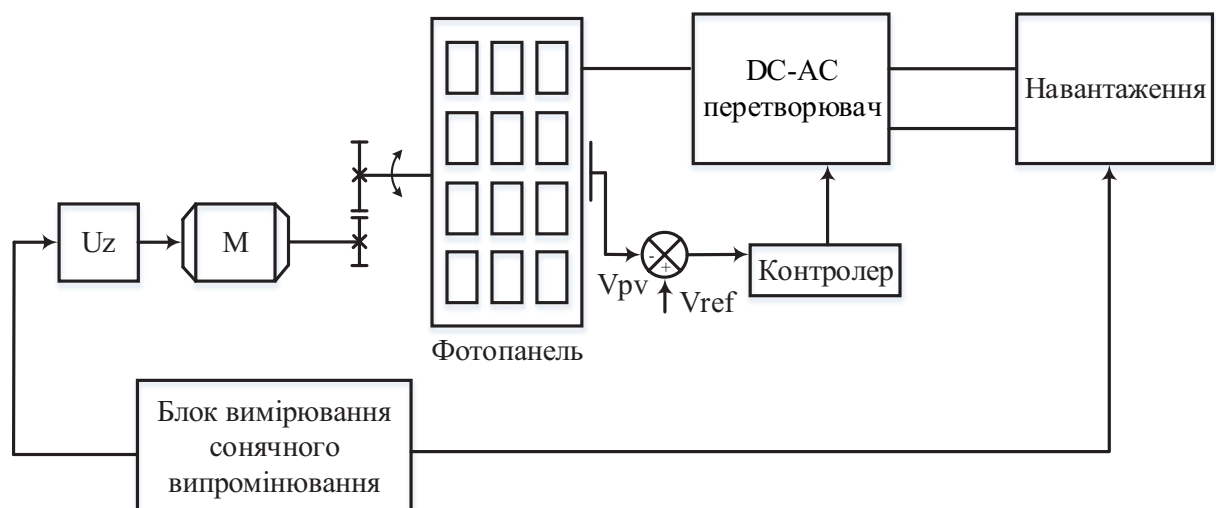


Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи керування фотоелектричної станції за методом постійної напруги

Дана система складається з сонячної фотопанелі, слідкуючого електроприводу положення панелі (U_z , M), перетворювача DC-AC, трифазного інвертора напруги, а також асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, поєднаного з водяним насосом.

Основним компонентом фотоелектричної системи є фотопанель, яка утворюється з індивідуальних фотоелементів, з'єднаних між собою

паралельно і послідовно для підвищення вихідної напруги та потужності. Перетворення постійного струму в змінний для живлення двигуна здійснюється інвертором напруги, який складається з транзисторів T1– T6 на основі IGBT. Забезпечення максимальної віддачі енергії фотопанеллю забезпечується допоміжним слідкуючим електроприводом М, налаштованим на пошук екстремуму сонячного випромінювання.

Схема управління головним електроприводом складається з двох частин, перша – управління підсилювачем для підтримання постійної напруги в ланці постійного струму, друга – для керування інвертором у векторноорієнтованому режимі для врахування зміни сонячного випромінювання, а також умов навантаження [50].

У якості проектованої системи обрано фотоелектричну насосну станцію тільки з одним приводом, для управління підсилювачем.

2.2 Постановка задачі

Розробка автономної фотоелектричної насосної станції широкого призначення (водопостачання, зрошення, дренажування). В ході виконання роботи передбачається побудова концепції проекту, визначення параметрів, що підлягають контролю, регулюванню та сигналізації; вибір пристроїв і засобів контролю та регулювання, які дозволяють управляти ходом робочого процесу, дослідження роботи електромеханічної системи.

Автоматизація фотоелектричної станції сприятиме поліпшенню умов праці, економії енергії, матеріалів, підвищенню продуктивності виробництва.

2.3 Вимоги до електроприводу та систем автоматизації

На основі виконаного аналітичного огляду і опису технологічної установки розглянемо основні вимоги до електроприводу.

Головним об'єктом керування в даній системі є насос. Це механізм з постійним навантаженням і тривалим режимом роботи. Насоси за своїм принципом дії поділяються на різні типи:

- лопатеві (відцентрові, осьові та діагональні), в насосах даного типу рідина переміщується під дією на неї лопаток робочого колеса;
- струминні (ежектори), в яких щоб подати рідину використовується енергія другого потоку рідини;
- об'ємні (насоси витискання), до них належати роторні і поршневі насоси (шестеренчасті, шиберні, гвинтові);

В досліджуваній системі в якості насосу обрано відцентровий насос.

Насос обирають, спираючись на вимоги до напору H та подачі (продуктивності) Q , які виходять з гідравлічних розрахунків системи перекачування рідини. Вихідні дані визначаються проектом водопостачання чи каналізації.

Стосовно насосу висуваються певні умови:

- Продуктивність насосу не повинна бути меншою за $36 \text{ м}^3 / \text{год}$;
- Значення напору повинно сягати в 59 м ;

2.3.1 Вимоги до комплексу розв'язуваних завдань

Для реалізації завдання управління насосної установки електропривод повинен забезпечувати:

- запуск і зупинку насоса;
- автоматичну зміну частоти обертання валу двигуна для підтримки постійного тиску в споживчій мережі;
- в разі надходження аварійного сигналу від датчика (при відхиленні параметрів від допустимих меж) здійснити екстрену зупинку;
- захист електродвигуна від аварійних режимів роботи.

2.3.2 Вимоги до перехідних процесів

Характеристики перехідних процесів повинні відповідати таким вимогам:

- статична похибка в сталих режимах роботи дорівнює 0-3% ;
- перерегулювання при запуску не більше 5% для забезпечення справної роботи обладнання та магістралі, зменшення можливості їх пошкодження;
- перерегулювання тиску при підвищенні і пониженні навантаження не більше 10%.

2.3.3 Вимоги щодо безпеки

При проектуванні АСК повинні бути передбачені заходи щодо забезпечення безпеки при монтажі, експлуатації, обслуговування і ремонту технічних засобів відповідно до діючих на території України нормативними документами:

- "Санітарні норми проектування промислових підприємств";
- "Правила улаштування електроустановок";
- "Пожежна автоматика будинків і споруд";
- "Система стандартів безпеки праці (ССБП). Виробниче устаткування. Загальні вимоги безпеки";
- всі зовнішні елементи технічних засобів АСК, що знаходяться під напругою, повинні мати захист від випадкового дотику.
- доступ до обертових частин насосної установки повинен бути обмежений.
- електричні елементи повинні мати захисне занулення.

Повинні бути вжиті заходи щодо обмеження рівня виробничого шуму, так як установка експлуатується в зоні житлової забудови, а також передбачені засоби пожежогасіння.

2.3.4 Вимоги до ергономіки та технічної естетики

Насосна установка повинна розташовуватися в місці, зручному для її обслуговування технічним персоналом, що дозволить забезпечити швидкість, простоту, економічність технічного обслуговування і ремонту в нормальних і аварійних умовах.

Конструкція і розташування щитів, пультів, повинні забезпечити видимість і простоту обслуговування.

На обладнанні повинні бути встановлені таблички і нанесені позначення для забезпечення швидкості монтажу та ремонту.

2.3.5 Вимоги щодо експлуатації системи

Повинна бути розроблена інструкція по техніці безпеки при експлуатації насоса, де чітко вказані дані по:

- монтажу;
- введенню в експлуатацію;
- обслуговуванню;
- підключенню електрообладнання.

2.3.6 Вимоги щодо економічної доцільності

Застосування розробленої насосної установки повинно забезпечити значний економічний ефект, а саме:

- економію електроенергії;
- економію рідини;
- зменшення кількості обладнання, що бере участь у процесі роботи установки;
- дешевизну використовуваного обладнання;
- короткий термін окупності.

Висновки по розділу

1. Наведено опис досліджуваної системи, а саме її комплектація, обґрунтовано вибір компонентів системи. Здійснено опис взаємодії складових системи між собою, наведено їх переваги та недоліки. Складено функціональну схему системи керування автономною насосною станцією.

2. Сформульовано основні задачі, яку повинна реалізувати досліджувана система.

3. Детально описано вимоги, які висуваються електроприводу та системі автоматизації, а саме вимоги до: комплексу розв'язування задач, перехідних процесів, безпеки, експлуатації та ін. Наведено вимоги стосовно вибору насосного агрегату.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Оскільки досліджувана система не має певної прив'язаності до водопроводу, а її використання є універсальним, то було вирішено провести порівняння з вже існуючою, схожою за способом застосування, автономною системою. Прикладом порівняння, стала дизельна насосна станція ДНУ - 144/88 [51], технічні характеристики якої наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики насосної станції ДНУ – 144/188

Частота обертання насосу, об/хв	1500
Подача, м ³ / год	36
Напір, м	59
Споживча потужність, кВт	11.8
Максимальна висота всмоктування, м	8.2

3.1 Розрахунок потужності насосу

Використовуючи наведені вище значення, здійснимо розрахунок потужності двигуна.

Напір, який створюється насосом, записується, як:

$$H = H_{ГВ} + H_{ГН} + h_{ВВ} + h_{ВН}, \quad (3.1)$$

де $H_{ГВ}$ - геометрична висота всмоктування, $H_{ГН}$ - геометрична висота нагнітання, $h_{ВВ}$ - втрати в трубі всмоктування, $h_{ВН}$ - втрати в трубі нагнітання.

Потужність, яка надходить на переміщувану рідину – корисна потужність насоса знаходиться за формулою:

$$N_k = Q \cdot p, \quad (3.2)$$

де Q – подача ($\text{м}^3 / \text{с}$), p – напір (Па).

У практиці використовують інші одиниці вимірювання, а саме подачу в $\text{м}^3 / \text{год}$ та напір в м, тому вираз (3.2) набуває наступного вигляду:

$$N_k = 0.0027 \cdot Q \cdot H = 0.0027 \cdot 36 \cdot 59 = 5.7348 \text{ (кВт)}. \quad (3.3)$$

Потужність споживана насосом від двигуна є значно більшою потужності подачі рідини, за рахунок ККД насосу і записується, як:

$$N = \frac{N_k}{\eta_H} \quad (3.4)$$

До складу ККД насосу відносяться механічні, гідравлічні, а також об'ємні втрати потужності. Механічні – втрати на тертя; гідравлічні – втрати на подолання опору (гідравлічного) при русі рідини від входу до виходу з насосу; об'ємні - втрати від перетікання певної частини рідини в область зниженого тиску з області підвищеного тиску, також втрати в сальниках. Коефіцієнт корисної дії насосу виражає ступінь досконалості конструкції. Насоси кращих зразків досягають ККД в розмірі 94%. А якщо розглядати більш прості зразки, то ККД невеликих насосів сягає від 60 до 75%, середніх – в межах 70-80%, великих – 80-90%. Так, при перекачуванні забруднених рідин швидко зменшується об'ємний і гідравлічний ККД. При поганому профілактичному обслуговуванні падає механічний ККД. Зменшення ККД

веде до перевитрати електроенергії і збільшення експлуатаційних витрат на перекачування рідин. ККД насоса визначає економічну доцільність експлуатації насоса при зміні інших його енергетичних параметрів (напору, подачі, потужності) [52].

Щорічно вартість електроенергії, що витрачається насосом, в 30 - 40 разів більше вартості насоса, тому при зміні ККД насоса на 3 - 4% доцільніше замінити його новим або провести капітальний ремонт.

Оскільки потужність подачі рідини можна віднести до середнього типу потужності, то значення ККД сягатиме в 80%. Отже:

$$N = \frac{5.7348}{0.8} = 7.1685 \text{ (кВт)}. \quad (3.5)$$

Якщо розглядати потужність двигуна для насосу слід звернути увагу на коефіцієнт запасу. Слід вибирати значення $K_{\text{зап}}$ наступним чином:

$$\begin{aligned} N \leq 2 \text{ кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.5; \\ 2 \text{ кВт} < N < 5 \text{ кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.5 \div 1.25; \\ 5 \text{ кВт} < N < 50 \text{ кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.25 \div 1.15; \\ 50 \text{ кВт} < N < 100 \text{ кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.15 \div 1.05; \\ N > 100 \text{ кВт} - K_{\text{зап}} &= 1.05. \end{aligned}$$

Потужність двигуна насосу розраховується за наступною формулою:

$$P = N \cdot K_{\text{зап}} = 7.1685 \cdot 1.24 = 8.889 \text{ (кВт)}. \quad (3.6)$$

3.2 Вибір силового обладнання

Виходячи з числового значення потужності в (3.6), здійснено вибір насосу Pedrollo F 40/250B [53], з технічними характеристиками, які записані в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики відцентрового насосу Pedrollo F 40/250B

Потужність насосу, кВт	11
Напруга живлення, В	380
Подача, м ³ / год	36
Напір, м	60
Розміри всмоктуючого патрубку, мм	65
Розміри напірного патрубку, мм	40
Температура води, °С	від -10 до +90
Режим роботи	S1

У якості електродвигуна насосу обрано асинхронний двигун фірми АВВ серії M2AA 160MLA 4 [54], технічні характеристики записані в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики електродвигуна АВВ M2AA 160MLA 4

Номінальна потужність P_n , кВт	11
Номінальна лінійна напруга $U_{\text{лн}}$, В	380
Частота обертання n_n , об/хв	1500
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	0.87

Момент інерції J , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.04
Номінальний ККД η , %	87.5
Номінальна частота напруги f , Гц	50
Число пар полюсів p_n	2
Номінальне ковзання s_n , %	2.8
Критичне ковзання s_k , %	19.5
Перевантажувальна здатність λ	3
Параметри Г-подібної схеми заміщення у відносних одиницях	
Індуктивний опір розсіювання статора, x_1'	0.085
Активний опір статора R_1'	0.043
Приведений індукційний опір розсіювання ротора x_2''	0.13
Приведений активний опір ротора R_2''	0.032
Індукційний опір намагнічуючого контуру \bar{x}_μ	3.2

3.3 Розрахунок номінальних даних двигуна

Розрахунок кутової частоти напруги статора:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)} \quad (3.7)$$

Розрахунок синхронної швидкості [55]:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_0}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ (рад/с)} \quad (3.8)$$

Номінальну швидкість двигуна розрахуємо за формулою:

$$\omega_n = \omega_{xx} \cdot (1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.028) = 152.604 \text{ (рад/с)} \quad (3.9)$$

Враховуючи значення номінальної швидкості визначається номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{11000}{152.604} = 72.081 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (3.10)$$

Розрахунок критичного моменту:

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 3 \cdot 72.081 = 216.243 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (3.11)$$

Розрахунок фазної номінальної напруги двигуна:

$$U_n = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393 \text{ (В)} \quad (3.12)$$

Розрахунок фазного номінального струму статора:

$$I_n = \frac{P_n}{3 \cdot U_n \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{11000}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.875 \cdot 0.87} = 21.954 \text{ (А)} \quad (3.13)$$

Амплітудне значення напруги:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.268 \text{ (В)} \quad (3.14)$$

Амплітудне значення струму:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 21.954 = 31.048 \text{ (А)} \quad (3.15)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $r_1 = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_0} = \frac{310.268}{314} = 0.99 \text{ (Вб)} \quad (3.16)$$

3.4 Розрахунок Г-подібної схеми заміщення

Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми заміщення в Т-подібну використовують наступну методику:

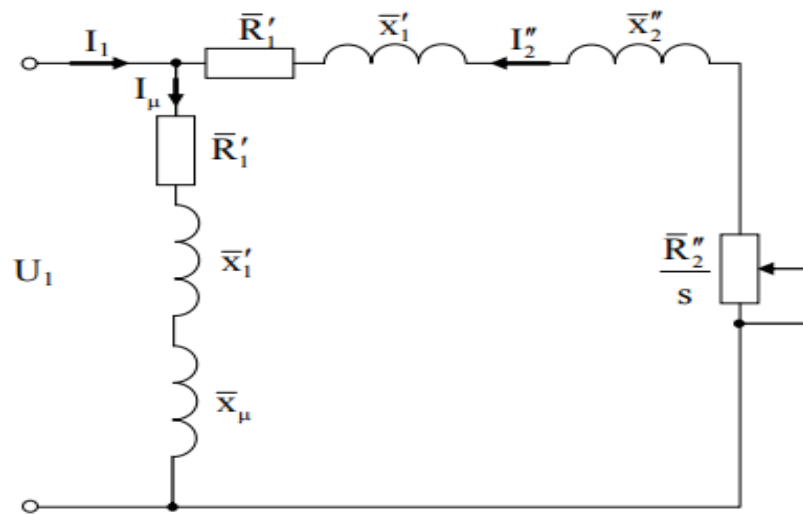


Рисунок 3.1 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

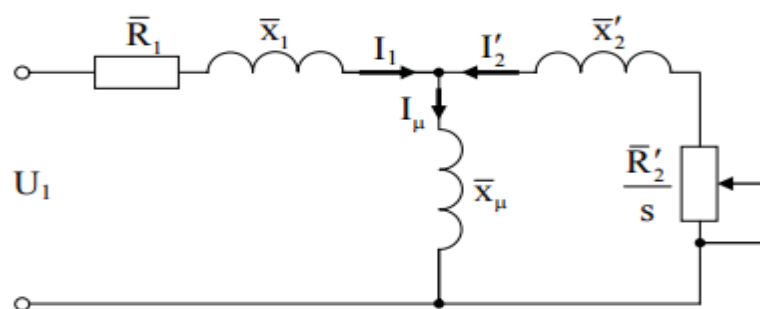


Рисунок 3.2 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Амплітудні та номінальні діючі значення фазного струму та напруги було розраховано і записано вище у рівняннях (3.10) - (3.12).

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення у абсолютних одиницях:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \bar{x}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.085 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.8494 (Ом) \\
R_1 &= \bar{R}_1 \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.043 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.4297 (Ом) \\
x_2' &= \bar{x}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.13 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 1.2991 (Ом) \\
R_2' &= \bar{R}_2' \cdot \frac{U_n}{I_n} = 0.032 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 0.31978 (Ом) \\
x_\mu &= \bar{x}_\mu \cdot \frac{U_n}{I_n} = 3.2 \cdot \frac{219.393}{21.954} = 31.9785 (Ом)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Розрахунок індуктивності намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{31.9785}{314} = 0.1018 (Гн) \tag{3.16}$$

Індуктивність розсіювання статора і ротора:

$$\begin{aligned}
L_{1\sigma} &= \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.8494}{314} = 0.0027 (Гн) \\
L_{2\sigma}' &= \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{1.2991}{314} = 0.00413 (Гн)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Індуктивність статора і ротора:

$$\begin{aligned}
L_1 &= L_m + L_{1\sigma} = 0.1018 + 0.0027 = 0.1045 (Гн) \\
L_2 &= L_m + L_{2\sigma}' = 0.1018 + 0.00413 = 0.10593 (Гн)
\end{aligned} \tag{3.18}$$

На основі даних розрахунків, обчислимо значення параметрів $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{R_2'}{L_2} = \frac{0.3197}{0.1059} = 3.0188 (\text{Ом} / \text{Гн}) \\
\sigma &= L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.1045 - \frac{0.1018^2}{0.1059} = 0.0066 (\text{Гн}) \\
\beta &= \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.1018}{0.1059 \cdot 0.0066} = 145.649 (1 / \text{Гн}) \\
\gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.4297}{0.0066} + 3.019 \cdot 0.102 \cdot 145.65 = 109.86 (\text{Ом} / \text{Гн})
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Розрахунки параметрів двигуна АВВ М2АА 160МЛА 4 занесені до Таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Обчислені параметри двигуна АВВ М2АА 160МЛА 4

$P_n, \text{кВт}$	11	$R_1, \text{Ом}$	0.4297
$\omega_{xx}, \text{рад} / \text{с}$	157	$R_2', \text{Ом}$	0.3197
$\omega_n, \text{рад} / \text{с}$	152.604	$L_1, \text{Гн}$	0.1045
$M_n, \text{Н} \cdot \text{м}$	72.081	$L_2, \text{Гн}$	0.1059
$M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	216.243	$L_m, \text{Гн}$	0.1018
λ	3	$J_\partial, \text{кг} / \text{м}^2$	0.04
$I_n, \text{А}$	21.954	α	3.0188
$\psi_{1xx}, \text{Вб}$	0.99	β	145.649
η	0.875	γ	109.866
$\cos(\varphi)$	0.87	σ	0.0066

Висновки по розділу

1. Проведено розрахунок насосної системи. Розраховано потужність електродвигуна насосу.

2. За розрахованою потужністю насосної системи здійснено вибір насосу - Pedrollo F 40/250B, а також асинхронного електродвигуна насосу - ABB M2AA 160MLA 4.

3. Розраховано номінальні дані електродвигуна, а також проведено розрахунок Т-подібної схеми заміщення, звідки отримали обчислені параметри двигуна.

4. Отримані результати дають можливість здійснити проектування та дослідження автономної електромеханічної системи водопостачання.

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Асинхронний двигун є одною з найпоширеніших електричних машин сьогодення, а в той же час являється майже одним із основних перетворювачів електричної енергії в механічну роботу. Головною перевагою являється відсутність контакту між рухомими і нерухомими частинами, в порівнянні з двигуном постійного струму де контакт здійснюється через колектор і щітки. Незважаючи на цю перевагу, асинхронний двигун має доволі таки складну математичну інтерпретацію [56].

при здійсненні математичного опису цього двигуна використовуються певні, загальноприйняті обмеження і припущення, а саме [57]:

- втрати в сталі відсутні;
- фазні обмотки двигуна симетричні і розташовані точно на 120° (для трифазних двигунів);
- магнітна система машини є ненасиченою;
- магніторушійні сили обмоток і магнітні поля розподілені уздовж кола повітряного зазору за синусоїдальним законом;
- величина повітряного зазору постійна;
- реальна розподілена обмотка замінена еквівалентною, зосередженою, яка створює ту ж саму магніторушійну силу;
- ротор машини є симетричним.

За рахунок сучасного розвитку комп'ютерних технологій є можливість побудови моделей асинхронного двигуна у фазних координатах з врахуванням прийнятих припущень і обмежень. Але враховуючи це структурна схема моделі виходить доволі складною через наявність змінних коефіцієнтів в рівняннях зв'язків потокозчеплень та фазних струмів двигуна,

які залежать від миттєвого значення кута повороту ротора відносно магнітних осей статора двигуна [58].

Втрати енергії в технологічному процесі залежать від технологічного навантаження, яке визначається споживачем, і втрат напору на обладнанні насосної станції - визначаються гідравлічним опором елементів схеми. Для організації технологічного процесу з мінімальними енергетичними втратами необхідно, в першу чергу, знизити втрати напору між трубопроводом насосного агрегату і мережею споживачів. Крім того, в процесі функціонування, в залежності від режимів роботи системи, може змінюватися тиск перед насосом. Такий характер взаємозв'язку параметрів вимагає установки в системі дросельних регулюючих елементів - регулюючих клапанів (іноді їх роль виконують запірні засувки агрегатів). Ці елементи створюють додатковий гідравлічний опір і дозволяють забезпечити стабільний тиск в мережевому трубопроводі. При використанні дросельних елементів відбувається розподіл напору на елементах системи.

На величину втрат при дросельному регулюванні впливає не тільки регулюючий елемент: найчастіше на етапі проектування вибирається насосний агрегат з певним запасом напору, а при заміні насосних агрегатів нове обладнання може мати дещо завищені характеристики. Крім того, діапазон зміни вхідних тисків (перед всмоктуючим патрубком насосного агрегату) впливає на величину тиску за насосним агрегатом. Всі ці обставини призводять до того, що втрати енергії в ході технологічного процесу стають досить великими, що досягають 45 і більше відсотків від номінальної потужності агрегату [59].

Для вирішення завдання мінімізації втрат, пов'язаних з регулюванням тиску в мережі, необхідно виключити додаткові гідравлічні опори на ділянці від насосного агрегату до мережевого трубопроводу, тобто необхідно повністю відкрити всю запірно-регулюючу арматуру. Це можна зробити, якщо процес регулювання тиску передати насосного агрегату. Теорія роботи

нагнітачів (насосів і вентиляторів) доводить, що зміна частоти обертання приводу нагнітача змінює його напірні характеристики, крім того, натиск створюваний насосом, пропорційний квадрату частоти обертання агрегату.

Якщо організувати роботу приводу насосного агрегату таким чином, щоб він при зміні параметрів технологічного процесу (витрати в мережі і тиску на вході агрегату) змінював частоту обертання, то в підсумку можна без істотних втрат енергії стабілізувати тиск в мережі споживачів. При такому способі регулювання виключаються втрати напору (немає дросельних елементів), а значить, і втрати гідравлічної енергії.

Спосіб регулювання тиску в мережі шляхом зміни частоти обертання приводу насосного агрегату знижує енергоспоживання ще й з іншої причини. Власне насос як пристрій перетворення енергії має свій коефіцієнт корисної дії - відношення механічної енергії, яка додається до валу, до гідравлічної енергії, одержуваної в напірному трубопроводі насосного агрегату.

Відповідно до теорії подібності максимум коефіцієнта корисної дії зі зменшенням частоти обертання трохи знижується і зміщується вліво. Аналіз необхідної зміни частоти насосного агрегату при зміні витрати в мережі показує, що зі зменшенням витрат потрібно знижувати частоту обертання. В цьому випадку ККД насоса вище, ніж при роботі на номінальній частоті обертання. Таким чином, зниження частоти обертання відповідно до технологічного навантаження дозволяє не тільки економити споживану енергію за винятком гідравлічних втрат, а й отримати економічний ефект за рахунок підвищення коефіцієнта корисної дії самого насоса - перетворення механічної енергії в гідравлічну.

Застосування частотного регулювання приводом дозволяє істотно зменшити і експлуатаційні витрати, пов'язані з обслуговуванням агрегатів і систем. Наприклад, зниження перепаду тиску між всмоктуючим і напірним патрубками насосного агрегату збільшує термін служби сальникових

ущільнень, практично виключаючи гідроудари і забезпечує стабільність тисків в трубопроводах мереж, а також мінімізує витрати на обслуговування.

Технологія управління асинхронними двигунами, що забезпечує енергозбереження, обумовлена їх конструктивними особливостями і технічними параметрами, а також характеристиками навантаження.

Використання режиму зміни частоти напруги живлення дозволяє забезпечити номінальний момент обертання практично незалежно від частоти обертання валу. У той же час, зниження напруги живлення забезпечує зменшення споживаного струму і, відповідно, економію електроенергії.

Використання частотно-регульованого електроприводу в насосних станціях з перекачуванням рідини, має ряд відмінностей, пов'язаних з масовим використанням відцентрових конструкцій насосів, які відрізняються тим, що для них витрати пропорційні частоті обертів крильчатки, тиск пропорційний квадрату числа обертів, а споживана потужність - кубічного ступеня. Відповідно за формулами приведення відцентрових насосів ці параметри емпірично можна виразити таким чином:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2; \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (4.1)$$

де Q - витрата, n - частота обертання, H - напір, N - потужність споживана електродвигуном.

Енергія, яку використовує електродвигун із мережі, прямо пропорційна добутку витрати на перепад тиску на насосі:

$$N = Q \cdot \eta_n (H_2 - H_1), \quad (4.2)$$

Виходячи з цього, слід обрати електропривод з частотним керуванням.

Як показує практика для приведення турбомеханізмів в рух слід застосувати квадратну залежність напруги від частоти $U / f^2 = \text{const}$. За рахунок цього зменшуються втрати активної потужності під час навантаження.

$$U_{lm} = \left(U_{ld}^2 + U_{lq}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \psi^* \sqrt{\alpha_1^2 + \left(\omega^* p_n \right)^2} \quad (4.3)$$

$$U_{lm} = \left(\psi^* + (\psi_n^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{on}} \right) \sqrt{\alpha_1^2 + \left(\omega^* p_n \right)^2} \quad (4.4)$$

Фізичні напруги, що прикладаються до обмоток АД дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin \theta_0(t) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\hat{\theta} = \omega^* p_n$$

Для того щоб реалізувати даний алгоритм керування слід знати параметр, який визначається на основі стандартних тестів - α_1 .

Потреби у здійсненні виміру струмів статора, а також кутової швидкості для реалізації алгоритму (4.5) немає. Щоб встановити зв'язок алгоритму частотного керування (4.5) слід записати вираз модуля напруги статора (4.6).

$$\begin{aligned} u_{ld} &= \alpha_1 \psi^* \\ u_{lq} &= \omega^* p_n \psi^* \\ \psi^* &= \psi_0^* + (\psi_a^* - \psi_0^*) \frac{\omega^* p_n}{\omega_{on}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Структурну схему алгоритму частотного керування з квадратною залежністю U від f зображено на рис. 4.1 [60].

5 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОПАНЕЛІ

5.1 Розробка алгоритму керування фотопанелі

Фотопанель –це інтерфейс, здатний перетворювати світло в електричну енергію. Для моделювання цього пристрою обов’язково потрібно мати дані про погодні умови (опромінення та температуру) в якості вхідних змінних. На виході може бути струм, напруга, або потужність. Будь яка зміна вхідних значень означає зміну результатів, тому важливим є використання адекватної моделі для фотопанелі. В повинний бути представлений вплив опромінення та температури на параметри фотоелектричного модуля. Дана модель є моделлю з одним діодом, з послідовними та паралельними резисторами для більшої точності.

Чим краща еквівалентна схема моделі, тим більше невідомих параметрів. Більшість технічних паспортів виробників не містять достатньо інформації про параметри, які залежать від погодних умов (опромінення та температури). Отже деякі припущення щодо фізичної природи поведінки необхідні для встановлення математичної моделі фотопанелі.

Головною метою досліджуваної моделі є отримання в будь який час максимальної потужності, близької до експериментальних величин.

Зовнішня характеристика панелі $I(V)$ – це нелінійне рівняння з безліччю параметрів, класифікованих наступним чином: ті, що надаються конструктором, ті, що відомі як константи, і ті, які необхідно обчислити. Іноді розробляються спрощені методи, у яких деякі невідомі параметри не можуть бути розрахованими. Таким чином вони вважаються постійними. Наприклад, у [61] був включений послідовний опір R_s , без паралельного для моделі помірної складності. Те саме припущення прийнято в роботах [62], вважаючи паралельний опір дуже великим. Інші автори нехтують, як

паралельним так і послідовним опорами, вважаючи, що послідовний опір дуже малий, а паралельний дуже великий. З іншого боку в літературі є й інші статті, в яких ці дві внутрішні характеристики фотоелектричного модуля вважаються дуже важливими і повинні бути врахованими більш точно, як у [63-66]. Крім опорів слід визначити ще й інші параметри, а саме фотострум (I_{ph}), струм насичення (I_0), та коефіцієнт ідеальності (A).

Враховуючи розраховане вище значення потужності здійснимо вибір фотопанелі АХМ144-9-166-470 [67], з технічними характеристиками, які наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики фотопанелі АХМ144-9-166-470

Вихідна потужність P_{max} , Вт	470
Напруга P_{max} V_m , В	41.44
Струм P_{max} I_m , А	10.87
Напруга холостого ходу V_{oc} , В	50.16
Струм КЗ I_{sc} , А	11.48
Температурний коефіцієнт (P_{max}), γ , % / °C	-0.365
Температурний коефіцієнт (V_{oc}), β_{voc} , % / °C	-0.285
Температурний коефіцієнт (I_{sc}), α_{isc} , % / °C	-0.055
Максимальна напруга системи V_{max} , В	1000
Робоча температура, °C	-40~85

5.2 Представлення фотопанелі

5.2.1 Ідеальна схема з одним діодом

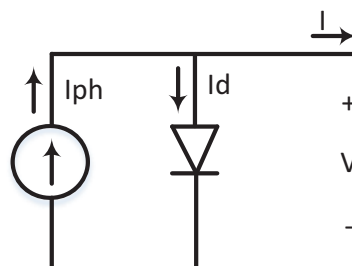


Рисунок 5.1 – Ідеальна схема з одним діодом

Якщо розглянути рис. 5.1 , то можна побачити, що схема не враховує внутрішні втрати струму. Діод з'єднаний антипаралельно з джерелом струму, що генерується світлом. Вихідний струм I отримується за законом Кірхгофа:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (5.1)$$

I_{ph} – фотострум, I_d – діодний струм, який пропорційний струму насичення і задається рівнянням:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{A \cdot N_s \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

де V – напруга, яка накладається на діод.

$$V_t = \frac{k \cdot T_c}{q} \quad (5.3)$$

де I_0 – зворотний струм насичення, або витоку діода (А); $V_t = 26$ (мВ) при 300 К для силіцієвої комірки; T_c - фактична температура комірки (К); $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана; $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ - заряд електрона.

V_t - теплова напруга, через її виключну залежність від температури [68,69,70]; N_s - кількість послідовно з'єднаних фотоелементів; A – фактор ідеальності, це стала, яка залежить від технології фотоелементів.

Всі складові, на які ділиться V в рівнянні (5.2) за експоненціальною функцією є обернено пропорційними температурі комірки і тому змінюються залежно від різних умов. У даній роботі цей термін позначається як 'а' і називається тепловою напругою (В). Коефіцієнт ідеальності визначається з таблиці 5.2 відповідно до технології фотоелемента.

Табл. 5.2 – Коефіцієнт ідеальності за типом технології фотоелемента

Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8

A-Si-H tandem	3.3
A-Si-H triple	5
cdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot k \cdot T_c}{q} = N_s \cdot A \cdot V_t \quad (5.4)$$

5.2.2 Практична схема з послідовним опором

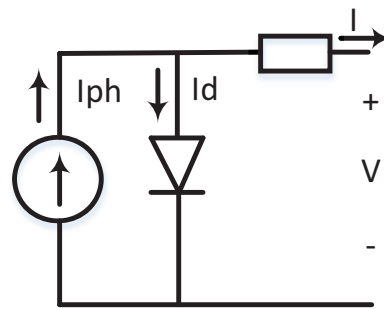


Рисунок 5.2 – Практична схема з послідовним опором

Насправді неможливо нехтувати послідовним опором R_s і паралельним опором R_p через їх вплив на ефективність фотоелемента. Коли враховується R_s , рівняння (5.2) приймає наступний вигляд:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] \quad (5.5)$$

5.2.3 Практична схема з послідовними та паралельними опорами

Схема, зображена на рис. 5.2, має спрощену форму, тому є простою для моделювання. Але для повного представлення фотопанелі краще підходить схема, зображена на рис. 5.3.

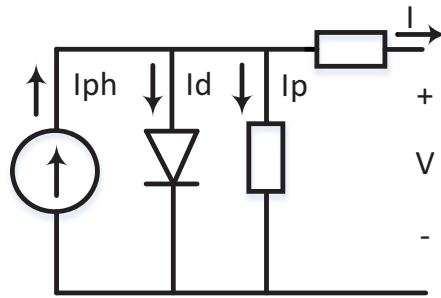


Рисунок 5.3 - Практична схема з послідовними та паралельними опорами

Застосовуючи закон Кірхгофа, рівняння для визначення струму набуває вигляду:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (5.6)$$

I_p - витік струму в паралельному резисторі.

Відповідно до рівняння (5.2), вихідний струм, що містить N_s комірок, буде таким:

$$I_d = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (5.7)$$

Визначити параметри цього рівняння непросто, але воно найкраще підходить для експериментальних значень.

5.3 Визначення параметрів

Кількість параметрів змінюється відповідно до обраної схеми та припущень, прийнятими дослідниками. Наприклад у роботі [64,71] вважається, що I_{ph}, I_0, R_s, R_p та A – це п'ять параметрів, які залежать від падаючої сонячної радіації та температури комірки. В той час як у [65,72], невідомими параметрами є I_{ph}, I_0, R_s, γ , де $\gamma = A \cdot N_s$.

У даному дослідженні обрано чотири параметри, які необхідно оцінити I_{ph}, I_0, R_s, R_p .

5.3.1 Визначення I_{ph}

Відповідно до схеми, зображеної на рис. 5.1, вихідний струм при стандартних умовах випробування становить:

$$I = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (5.8)$$

Це рівняння дозволяє визначити $I_{ph,ref}$, який не може бути визначений інакше. Коли фотоелемент замикається:

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V}{a_{ref}}\right) - 1 \right] = I_{ph,ref} \quad (5.9)$$

Але це рівняння справедливе лише в ідеальному випадку. Виходячи з цього, рівність не є правильною і її слід записати так:

$$I_{sc,ref} \approx I_{ph,ref} \quad (5.10)$$

Фотострум залежить як від освітлення, так і від температури:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} + \mu_{sc} \cdot \Delta T) \quad (5.11)$$

G - опромінення ($Вт / м^2$), $G_{ref} = 1000$, $Вт / м^2$ - опромінення при стандартних значеннях; $\Delta T = T_c - T_{c,ref}$, $К$, $T_{c,ref} = 25 + 273 = 298$, $К$ - температура комірки при стандартних значеннях; μ_{sc} - коефіцієнт температури струму короткого замикання ($А/К$), наданий виробником; $I_{ph,ref}$ - фотострум ($А$) при стандартних значеннях.

5.3.2 Визначення I_0

Шунтовий опір R_p зазвичай вважається великим, тому останню складову співвідношення у (5.8) слід виключити для наступного наближення. Застосовуючи рівняння (5.8) у трьох найвищих точках при стандартних

умовах випробування: напруга у розімкненому ланцюзі ($I=0, V=V_{oc,ref}$), сила струму при короткому замиканні ($V=0, I=I_{sc,ref}$), а також напруги ($V_{mp,ref}$) та струму ($I_{mp,ref}$) при максимальній потужності, можна записати такі рівняння:

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{I_{sc,ref} \cdot R_s}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (5.12)$$

$$0 = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (5.13)$$

$$I_{pm,ref} = I_{ph,ref} - I_{0,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{pm,ref} + I_{pm,ref} \cdot R_s}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad (5.14)$$

Членом (-1) слід знехтувати, оскільки він набагато менший, ніж експоненціальний член. Відповідно до рівняння (5.11) при підстановці ($I_{ph,ref}$) у рівняння (5.13):

$$0 \approx I_{sc,ref} - I_{0,ref} \cdot \exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}\right) \quad (5.15)$$

Тому:

$$I_{0,ref} = I_{sc,ref} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc,ref}}{a}\right) \quad (5.16)$$

Зворотний струм насичення визначається:

$$I_0 = DT_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k}\right) \quad (5.17)$$

ε_G - енергія ширини забороненої зони (eV), (1.12 eV для Si); D – коефіцієнт дифузії діодів.

Для усунення коефіцієнту дифузії діодів рівняння (5.18) обчислюється двічі в T_c і $T_{c,ref}$. Після цього в наступному виразі записується співвідношення двох рівнянь:

$$I_0 = I_{0,\text{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,\text{ref}}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \text{кГ} \quad (5.18)$$

$$I_0 = I_{\text{sc},\text{ref}} \cdot \exp \left(\frac{-V_{\text{oc},\text{ref}}}{a} \right) \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,\text{ref}}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (5.19)$$

Рівняння (5.20) представляє I_0 з певними параметрами, наданими виробником, як $(V_{\text{oc},\text{ref}}, T_{c,\text{ref}})$, та інші, що стосується технології фотоелемента, такі як (A, ε_G) . А вже 'а' і T_c залежать від фактичної температури. Ось чому I_0 повинен визначатись в режимі реального часу.

5.3.3 Визначення R_p та R_s

Для того щоб запропонована модель була більш точною, R_p та R_s вибирають таким чином, щоб обчислена максимальна потужність дорівнювала експериментальній потужності. Отже можна записати наступні рівняння:

$$\begin{aligned} I_{\text{mp},\text{ref}} &= \frac{P_{\text{mp},\text{ref}}}{V_{\text{mp},\text{ref}}} = \frac{P_{\text{mp},\text{ex}}}{V_{\text{mp},\text{ref}}} = \\ &= I_{\text{ph},\text{ref}} - I_{0,\text{ref}} \left[\exp \left(\frac{V_{\text{mp},\text{ref}} + I_{\text{mp},\text{ref}} \cdot R_s}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V_{\text{mp},\text{ref}} + I_{\text{mp},\text{ref}} \cdot R_s}{R_p} \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$R_p = \frac{V_{\text{mp},\text{ref}} + I_{\text{mp},\text{ref}} \cdot R_s}{I_{\text{sc},\text{ref}} - I_{\text{sc},\text{ref}} \left\{ \exp \left[\frac{V_{\text{mp},\text{ref}} + I_{\text{mp},\text{ref}} \cdot R_s - V_{\text{oc},\text{ref}}}{a} \right] \right\} + I_{\text{sc},\text{ref}} \left\{ \exp \left[\frac{-V_{\text{oc},\text{ref}}}{a} \right] \right\} - \left(\frac{P_{\text{max},\text{ex}}}{V_{\text{mp},\text{ref}}} \right)} \quad (5.21)$$

Ітерація починається з $R_s=0$, яка повинна збільшуватись, щоб переміщати змодельовану точку максимальної потужності, поки вона не почне збігатися з експериментальною точкою максимальної потужності. Потім відповідно обчислюється R_p . Існує тільки одна пара R_p та R_s , яка задовольняє умові. Реалізація представлена на рис. 5.16, де було використано

збільшення R_s до збігу P_{mp} з $P_{mp,ex}$. Три криві для трьох різних значень R_s представлені на рис.5.19-5.20. Експериментальне значення максимальної потужності, надане виробником модуля AXM144-9-166-3 [67], було використано у рівнянні (5.22). Ітераційний метод обчислення пари (R_s, R_p) дав $R_s = 0,45$ Ом, $R_p = 310,0248$ Ом. Ці два значення найбільше підходять до обраного модуля фотопанелі. Для моделювання іншого модуля фотопанелі в рівнянні (5.22) вводиться його максимальна експериментальна потужність, а потім знову використовується ітераційний метод для визначення відповідної пари (R_s, R_p) , що робить цю модель відповідною. Тепер модель з R_p можна використовувати для моделювання даного модуля при різних температурах та опроміненнях.

5.4 Моделювання фотопанелі

Першим етапом моделювання є підстановка рівняння (5.11) у (5.12), звідки отримуємо фотострум, після чого рівняння (5.12) реалізується в програмному середовищі MATLAB/Simulink. Результат представлений на рис. 5.4.

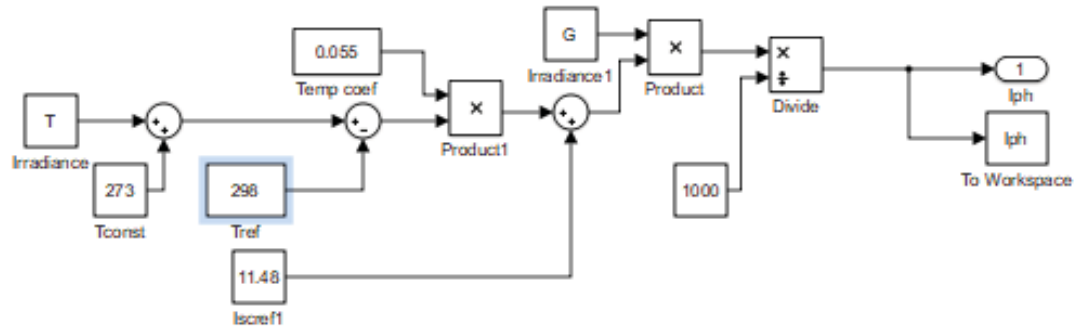
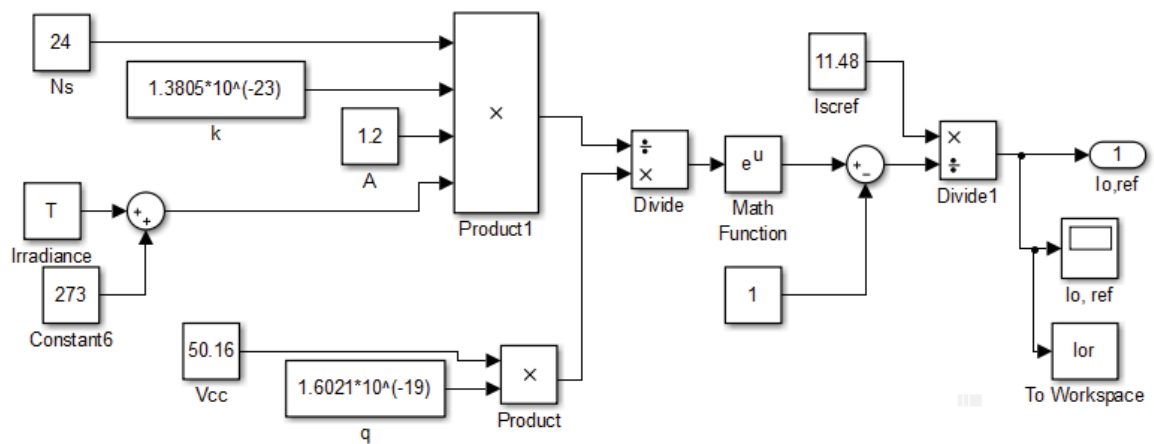
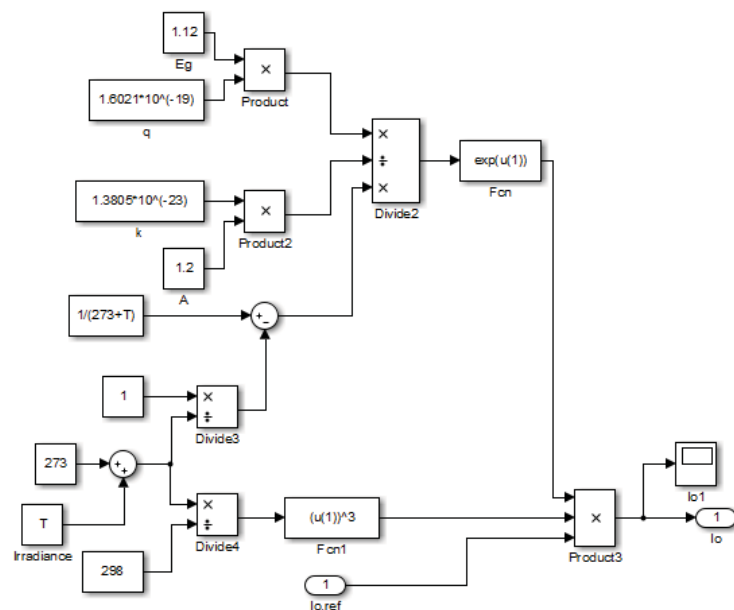
Зворотний струм насичення $I_{0,ref}$ також реалізується згідно рівняння (5.17). Підсистему можна побачити на рис. 5.5.

Виходячи з $I_{0,ref}$ складаємо модель I_0 , яка складається з рівняння (5.20) і зображена на рис. 5.6.

Рівняння (5.8) представлено у двох різних формах, з врахуванням паралельного опору R_p і без. Обидві форми рівняння (5.8) можна побачити на рис. 5.7 та рис. 5.8.

Повна модель фотопанелі зображена на рис. 5.9. Температура і опромінення є вхідними значеннями, вони задаються в головній підсистемі моделі - AXM144-9-166-470, як і значення R_s та R_p .

Згруповані підсистеми зображені на рис. 5.9.

Рисунок 5.4 – Детальна реалізація I_{ph} Рисунок 5.5 – Детальна реалізація $I_{0,ref}$ Рисунок 5.6 – Детальна реалізація I_0

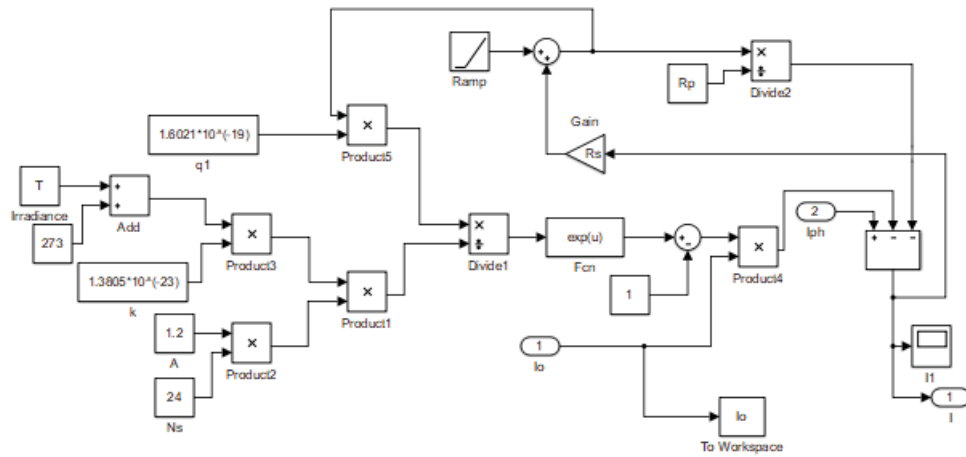


Рисунок 5.7 – Детальна реалізація I зі складовою R_p

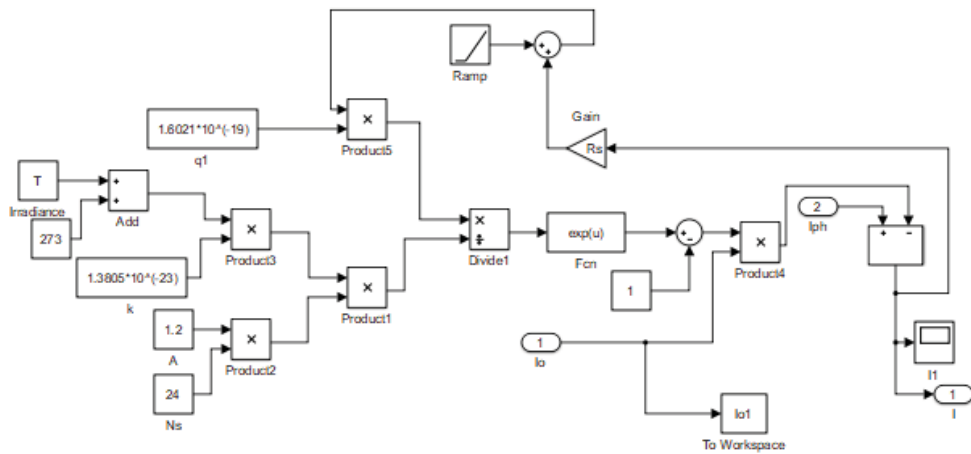


Рисунок 5.8 – Детальна реалізація I без складової R_p

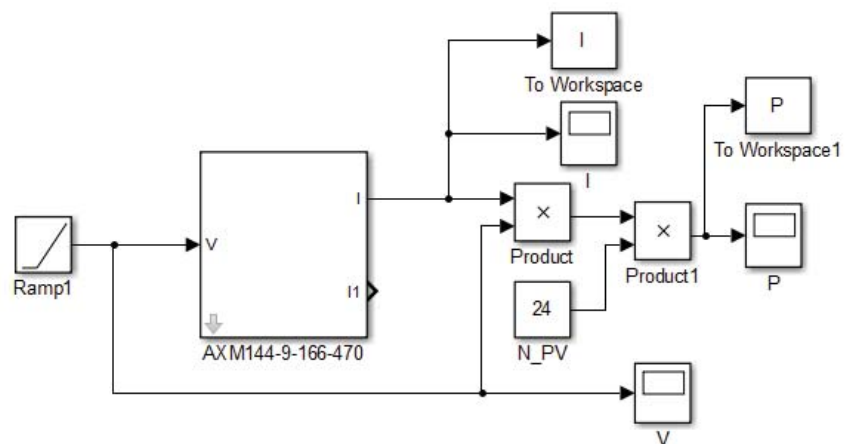


Рисунок 5.9 – Зовнішній вигляд моделі фотопанелі

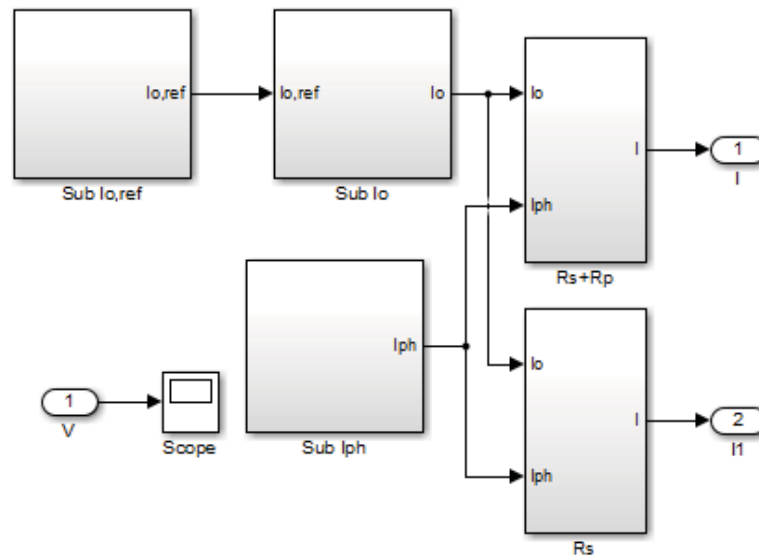


Рисунок 5.10 – Внутрішній вигляд підсистеми AXM144-9-166-470

5.5 Криві та інтерполяція

Спочатку зовнішня характеристика $I(V)$ будується для $R_s=0$ та $R_s=0.45$ Ом. Останнє значення послідовного опору надає виробник. Щодо рис. 5.11 і 5.12 слід додати, що ні I_{sc} ні V_{oc} не впливають на зміну послідовного опору. Незважаючи на це, форма характеристики переходить до більш прямокутної при зменшенні R_s . Точка максимальної потужності рухається вправо, отже P_{mp} знаходиться у зворотній пропорції до послідовного опору. Це відповідає співвідношенню коефіцієнта заповнення [68,73]:

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5.22)$$

Якщо I_{sc} та V_{oc} є постійними, то коефіцієнт заповнення FF залежить тільки від P_{mp} , це стосується як R_s так і R_p у рівнянні (5.21).

Запропонована модель R_p є більш точною та добре підходить для імітації фотопанелі AXM144-9-166-470. Для цього модуля доступні всі параметри для обчислення R_s та R_p . Значення були застосовані в детальній моделі з R_p , яка представлена на рис. 5.7.

Запропонована модель з R_p використовується для моделювання фотоелектричного модуля при різних значеннях освітленості та температури. Характеристики $I(V)$ представлені на рис. 5.15 шляхом зміни освітленості від 200 до 1000 Вт / м² при сталій температурі. На рис. 5.17 представлено зміну струму в залежності від зміни температури при сталому опроміненні. Аналогічні характеристики наведені і з потужністю.

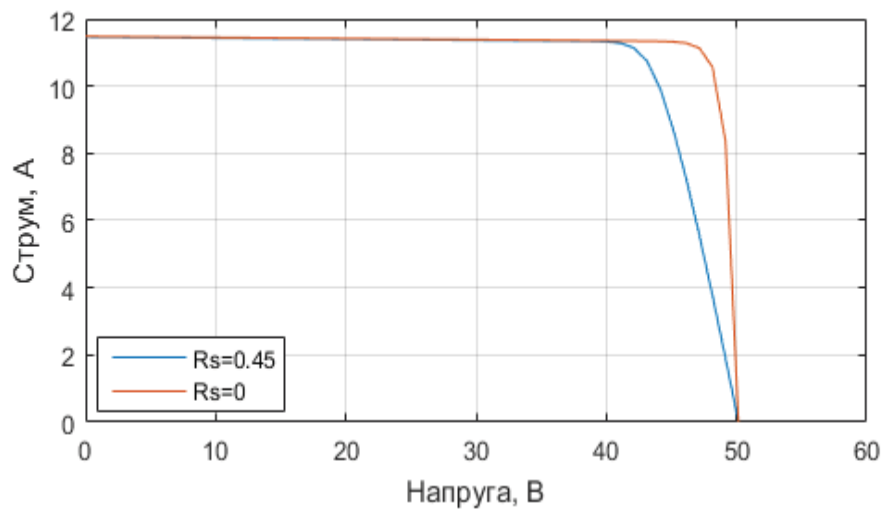


Рисунок 5.11 – Зовнішня характеристика моделі з R_p при зміні показника R_s

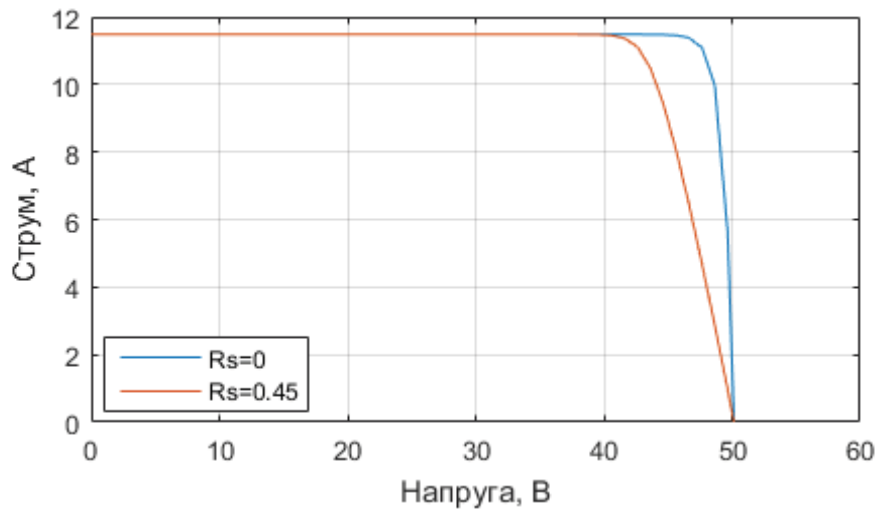


Рисунок 5.12 – Зовнішня характеристика моделі без R_p при зміні показника R_s

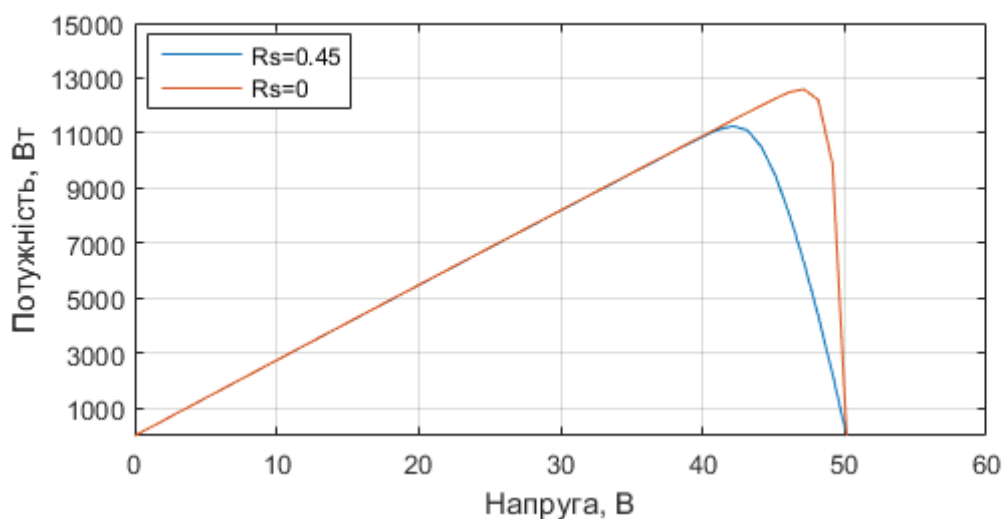


Рисунок 5.13 – Зовнішня характеристика моделі з R_p при зміні показника R_s

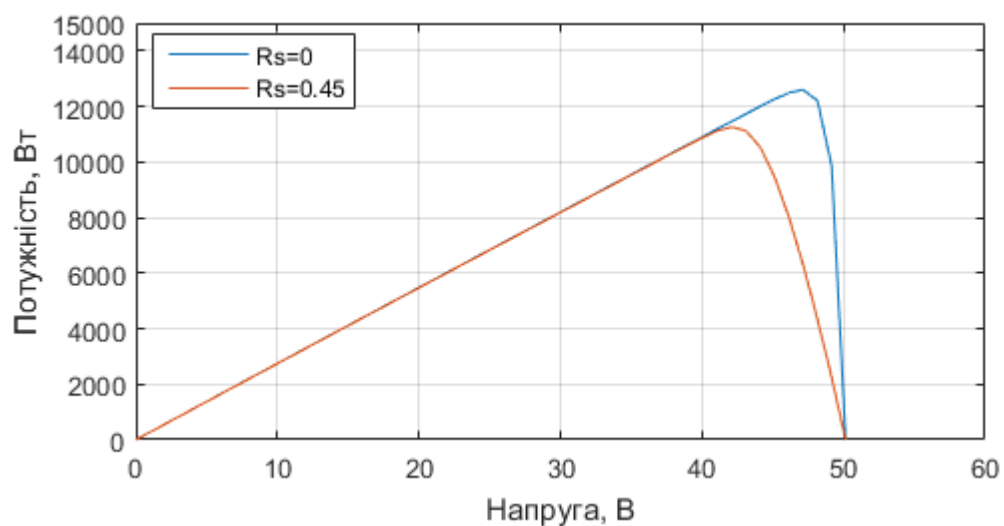


Рисунок 5.14 – Зовнішня характеристика моделі без R_p при зміні показника R_s

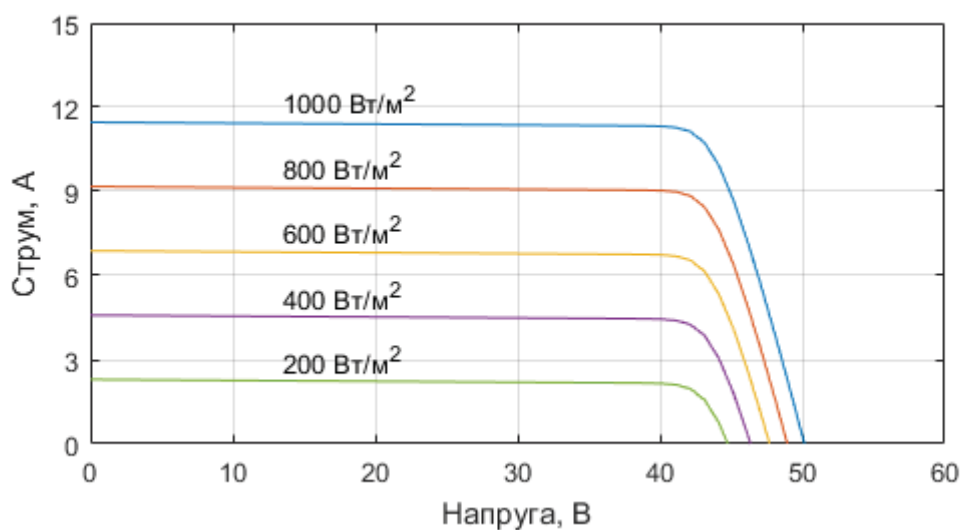


Рисунок 5.15 – Зовнішні характеристика моделі з R_p при зміні опромінення G

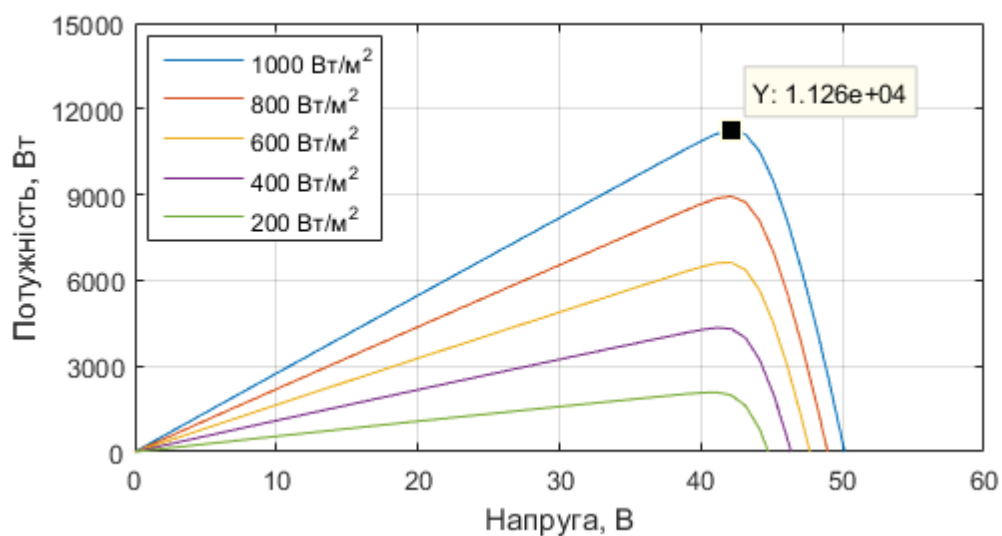


Рисунок 5.16 – Зовнішні характеристики моделі з R_p при зміні опромінення G

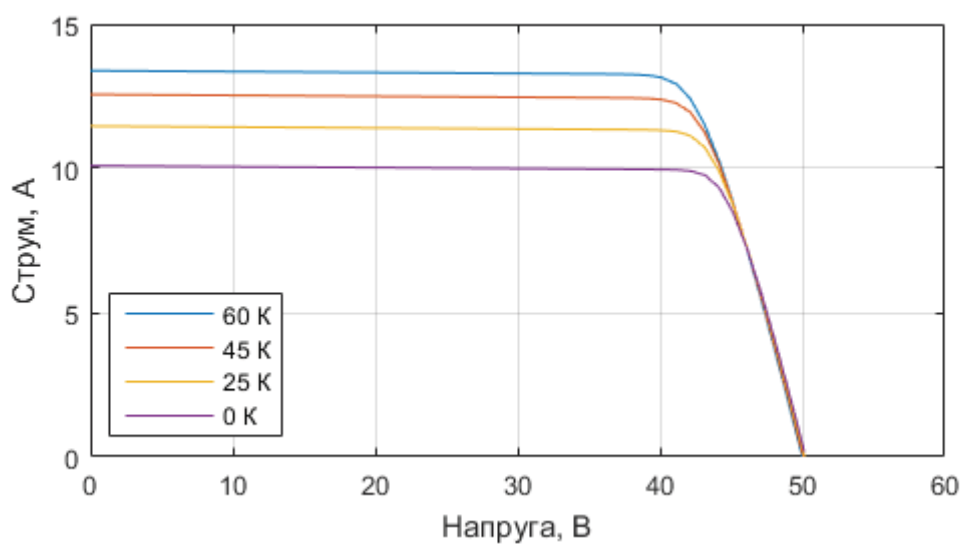


Рисунок 5.17 – Зовнішні характеристики моделі з R_p при зміні температури T

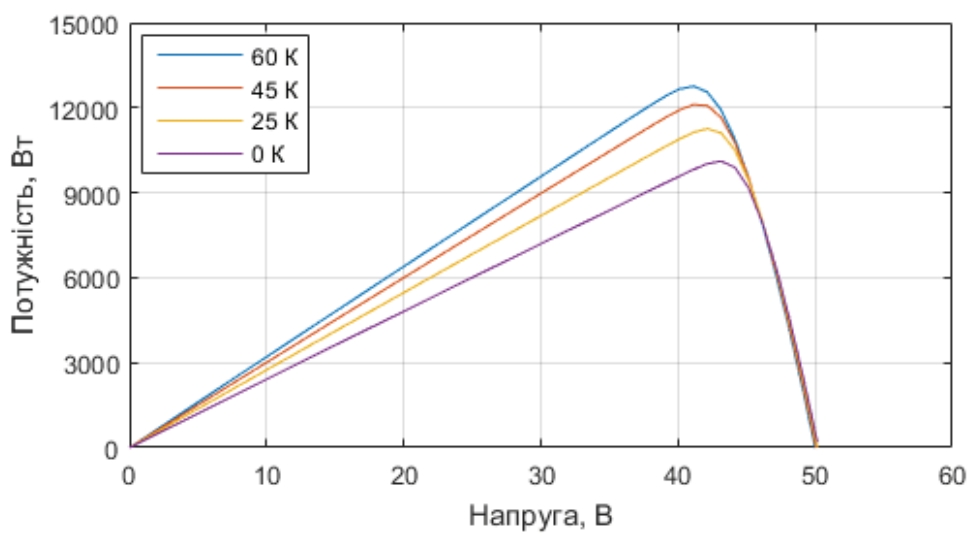


Рисунок 5.18 – Зовнішні характеристики моделі з R_p при зміні температури T

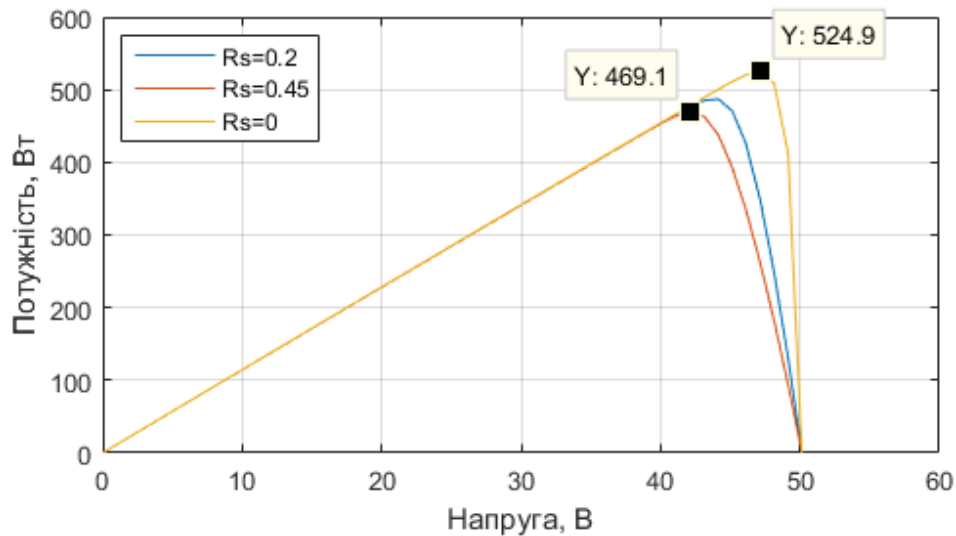


Рисунок 5.19 – Зовнішні характеристика для різних R_s в моделі з R_p

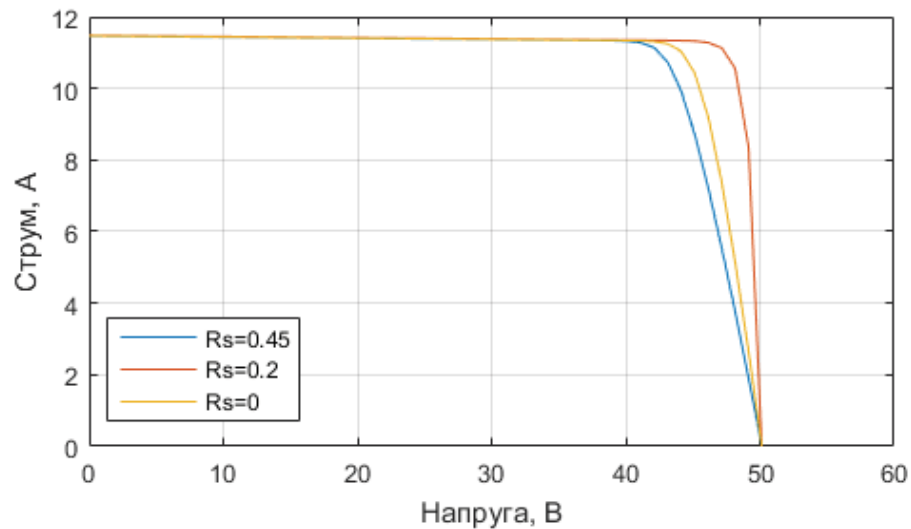


Рисунок 5.20 – Зовнішні характеристика для різних R_s в моделі з R_p

Висновки по розділу

1. В програмному середовищі MATLAB/Simulink розроблено детальну модель фотопанелі. Модель розроблена відповідно до технологій фотоелементів. Іншими словами, параметри фотомодуля були обрані відповідно до їх варіації з освітленістю та температурою. Це означає що для будь-якого типу фотомодуля можна використати цю модель і визначити всі необхідні параметри за будь-яких умов освітлення та температури, отримавши характеристики $I(V)$ та $P(V)$.

2. Дану модель можна розглядати як інструмент, який можна використовувати для вивчення всіх типів фотоелектричних модулів, доступних на ринках, особливостей їх поведінки за різних погодних умов для проведення стандартних випробувань.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

За допомогою моделювання проведемо дослідження динамічних, а також статичних характеристик головної складової автономної фотоелектричної системи - асинхронного електроприводу при живлення інвертора з ШІМ від фотоелектричної панелі.

В цьому розділі розроблено модель автономної системи водопостачання за допомогою програмного пакету MATLAB/Simulink. Здійснено імітацію реальної системи, яка складається з асинхронного двигуна, рівнянь, за допомогою яких реалізовано насос, інвертора, дискретного генератора ШІМ, регулятора напруги, та ін.

Оскільки підключення фотопанелі в моделюючій програмі доволі таки складно реалізувати, то в якості джерела постійної напруги обрано стандартний блок бібліотеки Simulink - DC Voltage Source в комплексі з паралельним і послідовним опорами R_p та R_s , відповідно.

У даному дослідженні використано номінальні параметри асинхронного двигуна, розраховані раніше, вони занесені до табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Номінальні параметри АД

Потужність двигуна, Вт	11000
Активний опір статора, Ом	0.4297
Приведений активний опір ротора, Ом	0.31978
Індуктивність намагнічуючого контуру, Гн	0.1018
Індуктивність розсіювання статора, Гн	0.0027
Індуктивність розсіювання ротора, Гн	0.00413
Момент інерції двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.04
Число пар полюсів двигуна	2
Номінальна лінійна напруга двигуна, В	380
Номінальна частота напруги двигуна, Гц	50

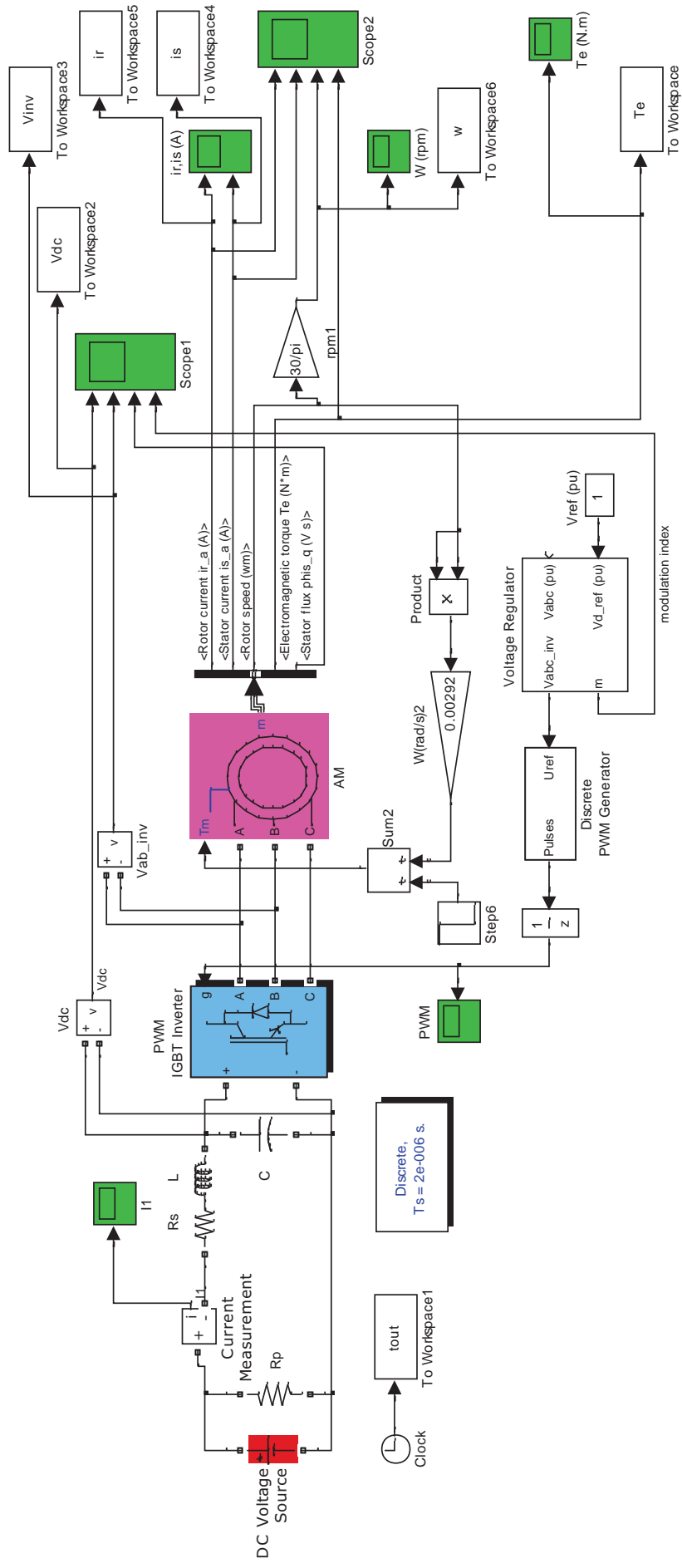


Рисунок 6.1 – Схема моделі досліджуваної системи

За допомогою даної моделі здійснено два досліді. А саме, дослідження динамічних та статичних характеристик при номінальній та зниженій вхідній напрузі фотопанелі. У двох наступних дослідях відбудеться зменшення моменту навантаження на валу двигуна насосу на 10 Нм в 1 с. Насос в даній моделі поданий у вигляді наступного рівняння:

$$K = \frac{M_n}{\omega_n^2} = \frac{72}{152.6^2} = 0.00292 \quad (6.1)$$

6.1 Перехідні процеси при номінальній вхідній напрузі

Промодельовавши систему, отримано графіки перехідних процесів, на яких видно чітко відпрацювання пов'язаних між собою компонентів системи. Дослід здійснено при значенні вихідної напруги фотопанелі 490 В.

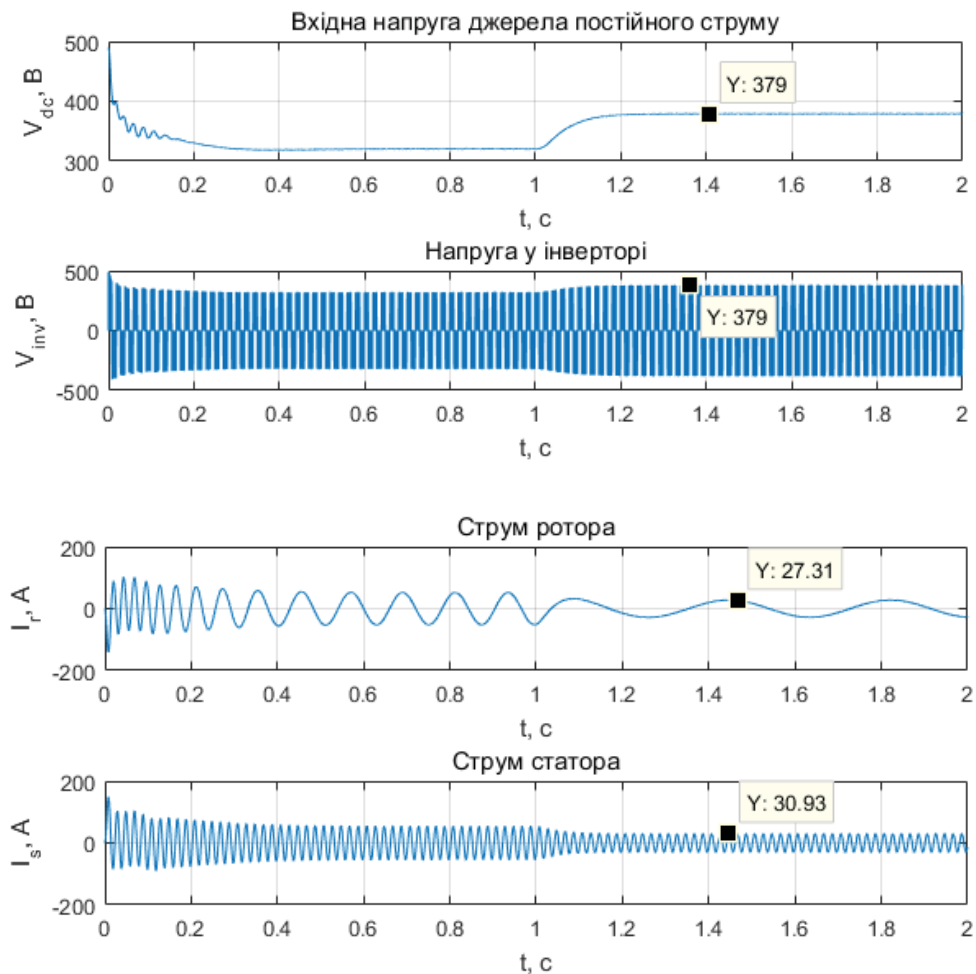


Рисунок 6.2 – Перехідні процеси двигуна при номінальній вхідній напрузі

$$U_{dc} = 490 \text{ В}$$

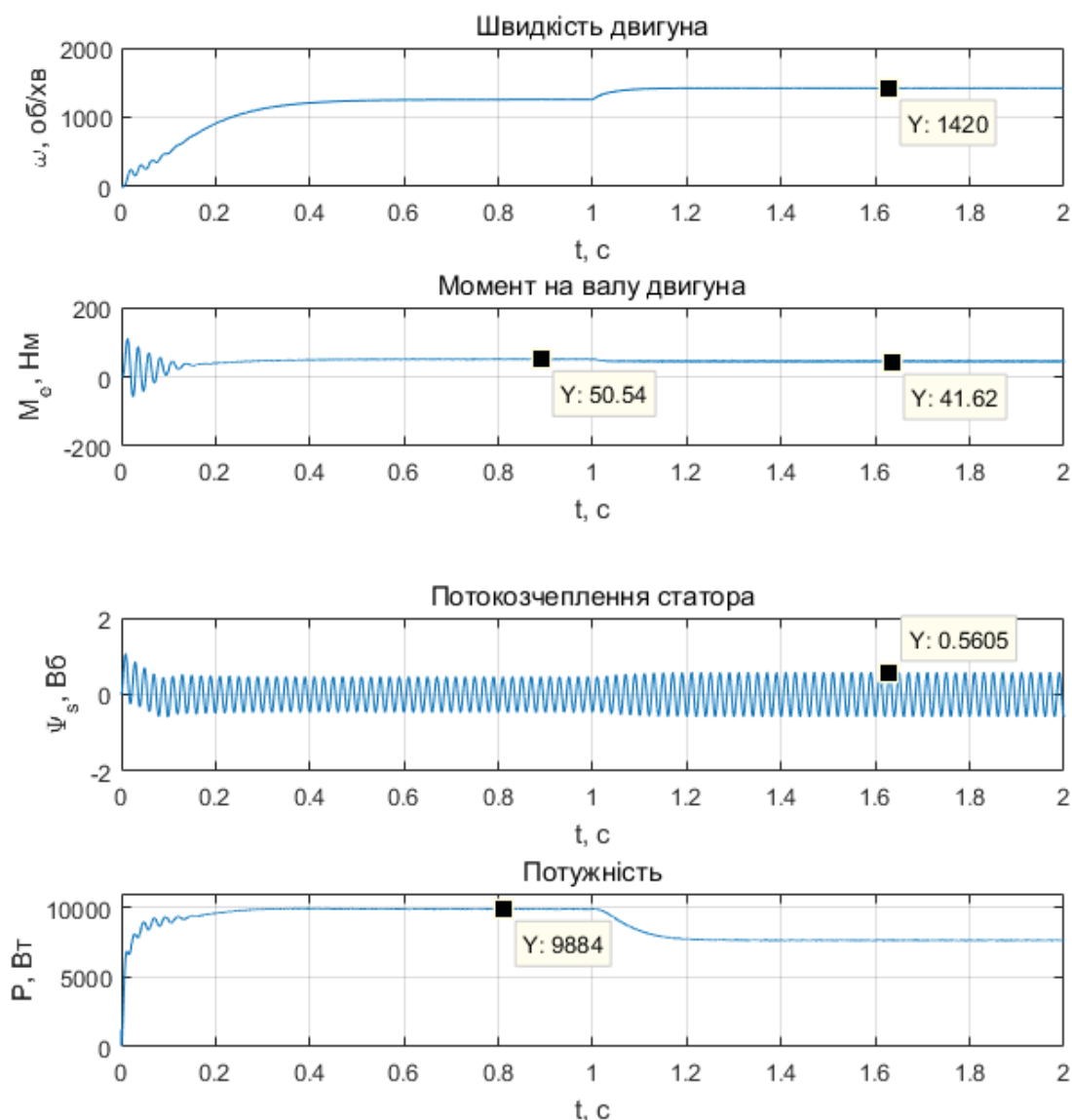


Рисунок 6.3 – Перехідні процеси двигуна при номінальній вхідній напрузі

$$U_{dc} = 490 \text{ В}$$

Перехідні процеси, отримані в результаті моделювання системи при номінальній вхідній напрузі, зображено на рис. 6.2 - 6.3. Напруга в період накидання навантаження на двигун зростає до номінального значення напруги двигуна 380 В. При накиданні навантаження, як струми ротора, так і струми статора зменшуються і близькі до номінальних даних двигуна, як це видно на рис. 6.2. Як видно з рис. 6.3 двигун розганяється до заданої швидкості за 1.1 с. Момент на валу двигуна має значення, близьке до номінального.

Отже дана система при номінальній входній напрузі є працездатною, що і слід було очікувати.

6.2 Перехідні процеси при зниженні входньої напруги

Так як в реальних умовах системи, в яких використовуються фотопанелі, можуть піддаватись зміні погодних умов, а саме зміні температури і опроміненні, то і вихідна напруга може змінюватись. В якості прикладу в досліді вихідну напругу фотопанелі буде зменшено на 100 В.

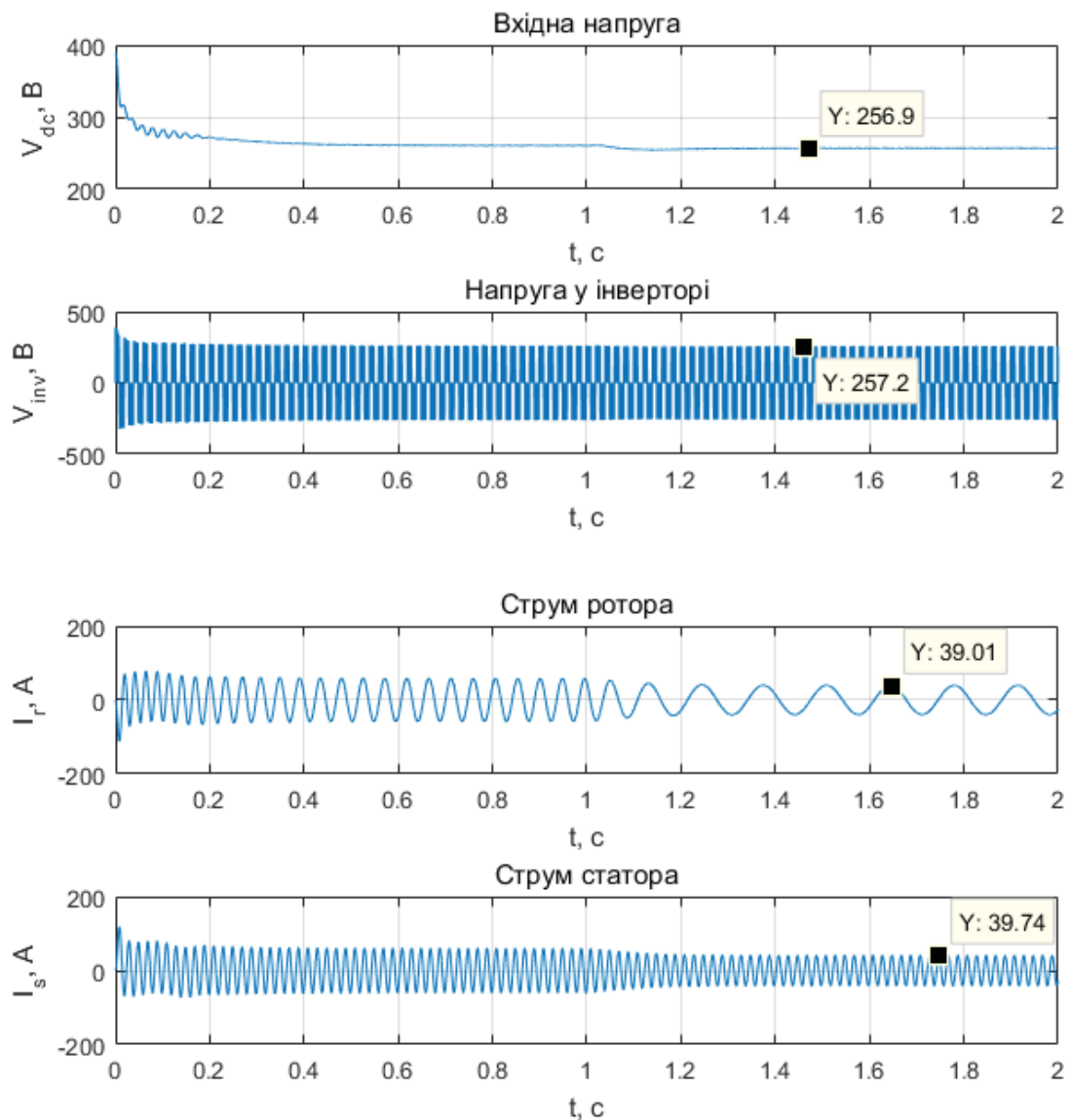


Рисунок 6.4 – Перехідні процеси двигуна при зниженій входній напрузі

$$U_{dc} = 390 \text{ В}$$

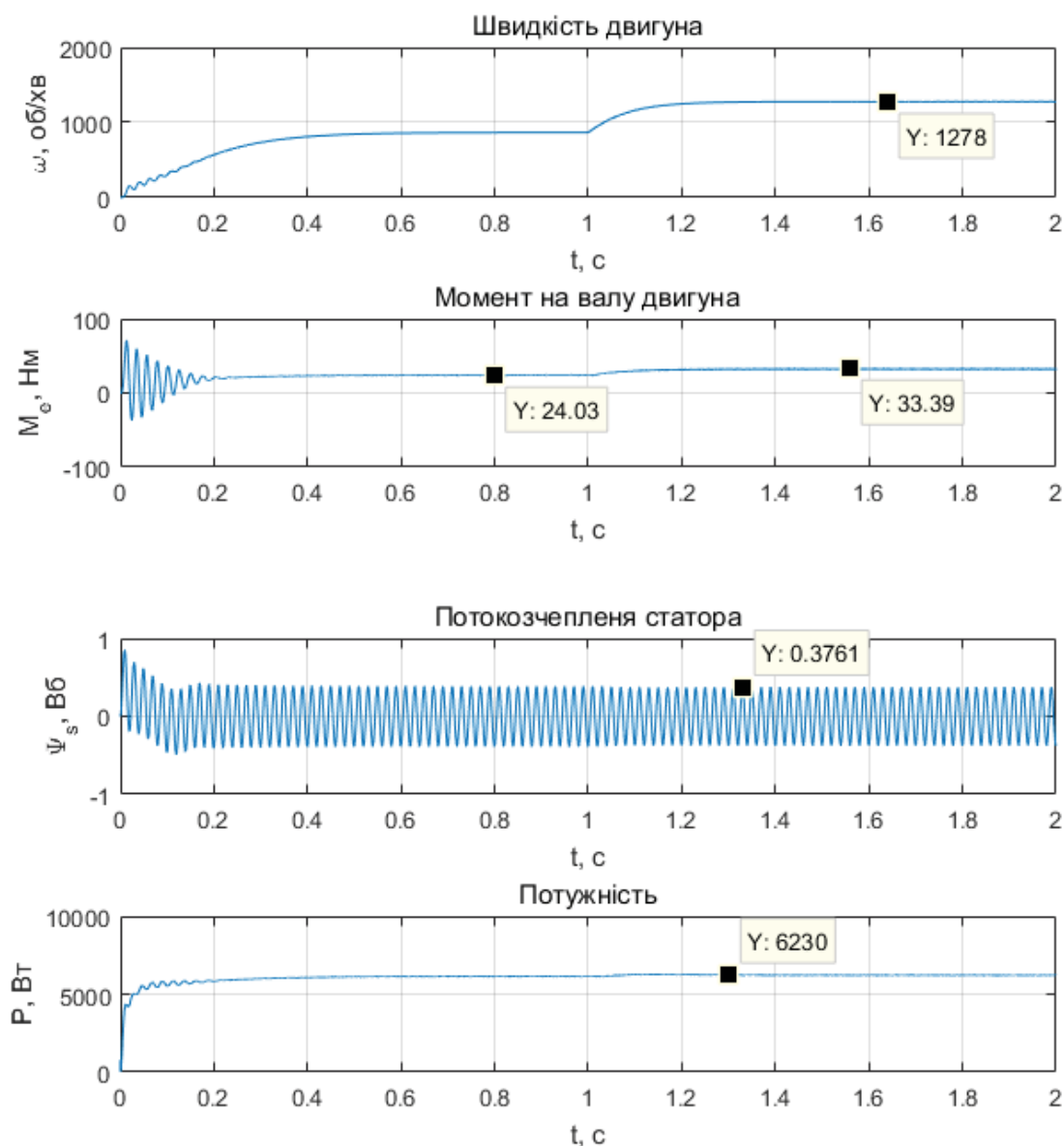


Рисунок 6.5 – Перехідні процеси двигуна при зниженій вхідній напрузі

$$U_{dc} = 390 \text{ В}$$

Розглянувши перехідні процеси отримані в результаті другого дослідження слід підмітити, що потужність знизилась, за рахунок меншого значення вхідної напруги. За рахунок чого відбулись зміни в струмах і моменті на валу двигуна.

Висновки по розділу

1. За допомогою програмного пакету MATLAB/Simulink складена та промодельована модель автономного фотоелектричного насосу.
2. Проведено дослід при номінальній та пониженій напрузі фотопанелі. З отриманих графіки перехідних процесів видно, що система є працездатною, а значення досліджуваних параметрів близькі до номінальних.

7 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Загальний вигляд функціональної схеми автономної фотоелектричної насосної станції зображено на рис.7.1.

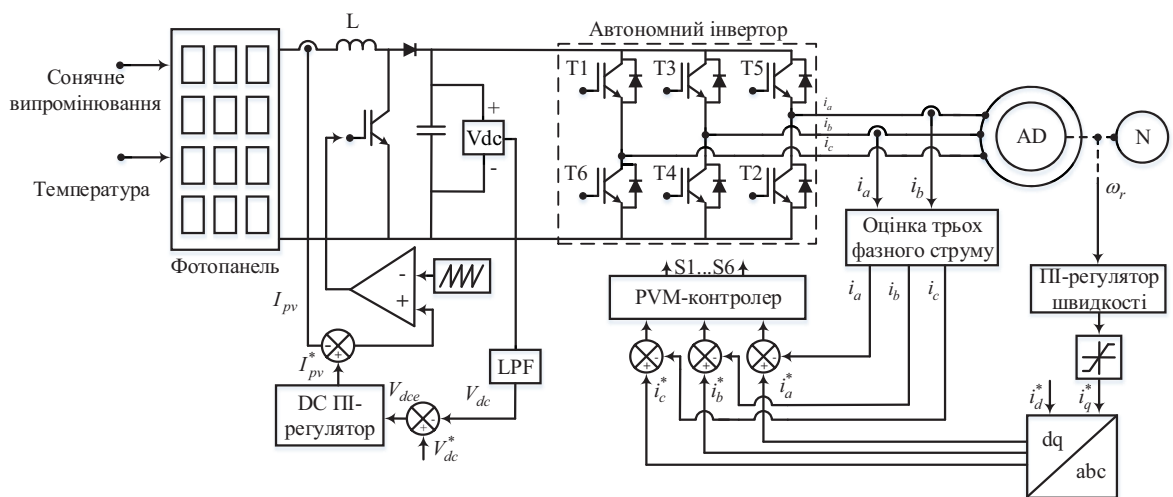


Рисунок 7.1 – Спрощена функціональна схема автономної фотоелектричної насосної станції

На основі параметрів двигуна ABB M2AA 160MLA 4, табл.2.3 виконуємо розрахунок силової частини ланки постійного струму і інвертора.

7.1 Розрахунок ланки постійного струму

Розрахуємо номінальне значення струму ланки постійного струму з врахуванням перевантаження:

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} \cdot P_{cont}}{U_{DCn} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{інв}} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 10^3}{500 \cdot 0.875 \cdot 0.95} = 52.932(A) \quad (7.1)$$

де $k_{ovl}=2$ - перевантажувальна здатність, $U_{DCmax} = 500$ В.

Максимальна зворотна напруга ключів повинна в 1.5 рази бути більшою максимальної напруги в ланці постійного струму.

Отже:

$$U_{ce} > 1.5 \cdot U_{dcmax}, \quad (7.2)$$

$$U_{ce} = 1.5 \cdot U_{DCmax} = 1.5 \cdot 500 = 750 \text{ (В)} \quad (7.3)$$

7.2 Розрахунок автономного інвертора

Максимальний струм на виході інвертора рівний максимальному струму двигуна, $I_{max} = 110 \text{ (А)}$.

Для того щоб обрати силовий модуль слід звернути увагу на певні критерії, а саме: $I_c > I_{max}$, $U_{cemax} > U_{ce}$, де U_{cemax} і I_c - це напруга колектор-емітер та тривалий струм.

У якості інвертора обираємо IGBT-модуль SK129GB12F4ET з параметрами $U_{ce} = 1200 \text{ В}$ та $I_c = 120 \text{ А}$ [74].

Для побудови повноцінного інвертора потрібно три стійки обраних модулів та три драйвери для їх керування.

7.3 Розрахунок драйверів керування ключами

Для керування IGBT транзисторами вибираємо драйвер SEMIKRON SKYPER 32 PRO R на сайті виробника [75]. Максимальний вихідний струм складає 15 А, типовий 50 мА. Максимальна частота перемикання 50 кГц. Напруга включення +15 В, напруга виключення -7 В.

Виконаємо розрахунок драйвера для ключа модуля SKM150GB12T4G. Енергія визначається наступним чином:

$$W = Q_G (U_{G(on)} - U_{G(off)}) = 18.7 \text{ (мкДж)}, \quad (7.4)$$

де $Q_G = 850 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ - заряд затвора, $U_{G(on)} = +15 \text{ В}$ - напруга відкриття затвору, $U_{G(off)} = -7 \text{ В}$ - напруга запирання затвору.

Розраховуємо коефіцієнт перерахунку ємності затвору:

$$K_C = \frac{Q_G}{C_{ies} (U_{G(on)} - U_{G(off)})} = 4.39, \quad (7.5)$$

де $C_{ies} = 8.8 \cdot 10^{-9}$ Ф – вхідна ємність.

Тоді ємність затвору буде:

$$C_G = K_C C_{ies} = \frac{Q_G}{(U_{G(on)} - U_{G(off)})} = 38.6 \text{ нФ}. \quad (7.6)$$

Для забезпечення типового струму в 200 мА при 15 В на включення резистор має бути

$$R_{on} = \frac{U_{G(on)}}{I_{G(on)}} = \frac{15}{0.2} = 75 \text{ Ом}. \quad (7.7)$$

Обираємо резистор M0.6W-300R номіналом 300 Ом та потужністю 0.6 Вт [76].

Для забезпечення типового струму в 50 мА при -7 В на виключення резистор має бути

$$R_{off} = \frac{U_{G(off)}}{I_{G(off)}} = \frac{7}{0.05} = 140 \text{ Ом.}, \quad (7.8)$$

Обираємо резистор M0.6W-150R номіналом 150 Ом та потужністю 0.6 Вт [76].

Визначаємо максимальну частоту комутації ключів на основі відомих даних:

$$t_{on} = R_{on} C_G = 24.3 \text{ мкс.}, \quad (7.9)$$

$$t_{off} = R_{off} C_G = 0.6 \text{ мкс.}, \quad (7.10)$$

$$f_{sw(max)} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = 77 \text{ кГц.}, \quad (7.11)$$

Виконаємо розрахунок драйвера для ключа модуля SKM300GA12T4. Енергія визначається наступним чином:

$$E = Q_G (U_{G(on)} - U_{G(off)}) = 37.4 \text{ мкДж}, \quad (7.12)$$

де $Q_G = 1700 \cdot 10^{-9}$ Кл – заряд затвора, $U_{G(on)} = +15$ В – напруга відкриття затвору, $U_{G(off)} = -7$ В – напруга запирання затвору.

Розраховуємо коефіцієнт перерахунку ємності затвору:

$$K_C = \frac{Q_G}{C_{ies} (U_{G(on)} - U_{G(off)})} = 4.39, \quad (7.13)$$

де $C_{ies} = 17.6 \cdot 10^{-9}$ Ф – вхідна ємність.

Тоді ємність затвору буде

$$C_G = K_C C_{ies} = \frac{Q_G}{(U_{G(on)} - U_{G(off)})} = 77.3 \text{ нФ}. \quad (7.14)$$

Візьмемо такі самі резистори, як були розраховані для модулю SKM150GB12T4G. Тоді визначаємо максимальну частоту комутації ключів на основі відомих даних:

$$t_{on} = R_{on} C_G = 23.2 \text{ мкс.}, \quad (7.15)$$

$$t_{off} = R_{off} C_G = 11.6 \text{ мкс.}, \quad (7.16)$$

$$f_{sw(max)} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = 28.7 \text{ кГц.}, \quad (7.19)$$

Таким чином ключі та драйвери можуть експлуатуватися з частотою перемикання до 28 кГц.

7.4 Розрахунок давачів струму

Вибір давача струму виконується за максимальним струмом, який необхідно вимірювати. В даній системі використовується замкнена система керування.

Давач струму (ДС) обираємо за значенням I_{dc} . Тому обираємо давачі струму СНК100 BR12S4 з номінальним струмом 100 А, діапазоном

вимірювання 200 А [77]. Точність даного давача ± 1 А. Напруга живлення +15 В.

Канал виміру напруги ланки постійного струму можна реалізувати на основі датчика типу LV-25NP [78], схема включення в схему зображена на рис. 7.2.

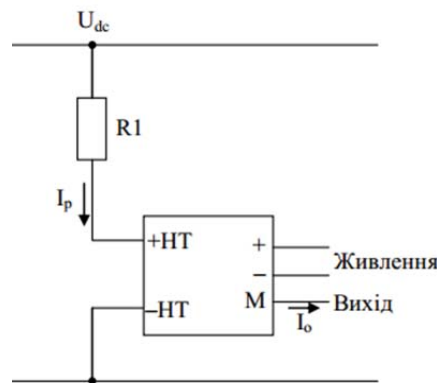


Рисунок 7.2 – Підключення датчика напруги

В документації сказано, що максимальний струм первинного кола давача складає $I_{pn} = 10$ $I_{pmax} = 14$ мА. Тому значення резистору R_1 дорівнює:

$$R_1 = \frac{U_{DCmax}}{I_{pmax}} = \frac{500}{14 \cdot 10^{-3}} = 35714 \text{ Ом.} \quad (7.20)$$

Обираємо резистор PR03-390K номіналом 490 кОм та потужністю 3 Вт [79].

Струм вторинного кола 25 мА, напруга живлення 15 В. На вторинне коло рекомендується ставити резистор від 100 до 190 Ом при живленні ± 15 В та струму первинного кола 14 мА. Обираємо резистор PMR3S-150R номіналом 150 Ом та потужністю 3 Вт [76].

7.5 Вибір давача швидкості

Обираємо як давач швидкості енкодер RM44IC001D610F2E10, параметри якого можна обрати на сайті [80].

Струм вторинного кола 25 мА, напруга живлення 15 В. На вторинне коло рекомендується ставити резистор від 100 до 190 Ом при живленні ± 15 В

та струму первинного кола 14 мА. Обираємо резистор PMR3S-150R номіналом 150 Ом та потужністю 3 Вт [76].

Таблиця 7.1 – Параметри енкодера

Параметр	Значення
Живлення Vdd, В	5, $\pm 5\%$
Споживання струму, мА	35
Вихідні сигнали	A, B, Z, A-, B-, Z-

7.6 Вибір обладнання для автоматизації

В якості основного керуючого пристрою системи автоматизації було обрано ПЛК Schneider Modicon M340-20 (див. плакат 5). Для візуалізації технологічного процесу до ПЛК по мережі Ethernet під'єднуються панель оператора Shneider Magelis HMISTU855 та мережеві станції [81, 82].

В якості мережевого вузла обрано модуль Schneider OTB 1E0 DM9LP [83], в якому вбудовано 12 дискретних входів і 8 дискретних виходів.

Для реалізації аналогових входів обираємо модуль розширення TWD AMI 8LT на 8 аналогових входів [81], а для реалізації аналогових виходів обираємо модуль розширення TWD AVO 2HT на 2 аналогові виходи [81].

Блок живлення обрано Schneider Modicon X80 [84].

Висновки по розділу

1. В даному розділі складено схему електричну принципову автономної системи фотоелектричного насосу.
2. Здійснено вибір елементів силової частини: IGBT модулів SK129GB12F4ET, які керуються драйверами SEMIKRON SKYPER 32 PRO R, давачів струму, напруги та швидкості. Проведено розрахунки параметрів кожного елемента.

3. Обрано обладнання керування автоматизацією системи.

8 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

7.7 Аналіз проекту

7.7.1 Організація стартап-проекту

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік, за яким здійснюється реалізація стартап-проекту;
- розраховується потреба у нематеріальних активах і основних засобах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, за рахунок чого здійснюється формулювання потреби у персоналі і матеріальних ресурсах;
- здійснюється розрахунок загальних, початкових витрат для запуску проекту, а також планові загальногосподарські витрати, потрібні для реалізації проекту.

7.7.2 Мета розробки плану

Цей бізнес-план складено для впровадження автономної фотоелектричної насосної станції для підприємств аграрного виробництва. Розглянуто питання доцільності закупівлі, встановлення і експлуатації нового обладнання. В якості електроприводу розглядається асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який поєднується з відцентровим насосом. Розрахунок проведений для двигуна, потужність якого становить 11 кВт. В подальшому передбачається впровадження додаткового приводу, за рахунок якого здійснюватиметься керування поворотом фотопанелі.

7.7.3 Аналіз ринку збуту

В світі набуває зростання попиту на використання відновлювальної енергетики, в тому числі запровадження “Зеленого тарифу”. Станом же на січень 2015 року, в Україні діяло 98 СЕС, загальною встановленою потужністю 819 МВт, якими у 2014 році вироблено 485 млн кВт*год

електричної енергії. Тобто, Україна має великі перспективи у видобуванні енергії з альтернативних джерел. А так як використання фотопанелей не несе за собою екологічного впливу на навколишнє середовище, то доцільність використання їх в якості джерела живлення є доволі таки високою.

Щоб визначити показники фінансової і економічної ефективності прийнято розрахунковий період терміном в 5 років. Період побудови системи автономного водопостачання від одного місяця до трьох.

7.7.4 Тарифи на електроенергію

В табл. 8.1 наведено тариф на електроенергію для підприємств, в середньому грн за кВт*год.

Табл. 8.1 – Тарифи на споживання електроенергії для підприємств

№	Групи споживачів	Класи напруги					
		1 клас (27,5 кВ та вище), коп./кВт*год			2 клас (до 27,5 кВ), коп./кВт*год		
		Без ПДВ	ПДВ	Усього	Без ПДВ	ПДВ	Усього
1	Промислові та привітряні до них споживачі з приєднаною потужністю 750 кВА і вище	157.10	35.2	192.3	599.13	42.4	641.53
2	Промислові та привітряні до них споживачі з приєднаною потужністю до 750 кВА	68.24	35.2	103.44	285.84	42.4	328.24

7.7.5 Організаційно-правовий план

Організаційною структурою управління автономною фотоелектричною насосною станцією прийнято, що вона містить у собі головний внутрішній резервуар для води з датчиком рівня, бак з двома датчиками рівня, фотопанелі з кріпленням, насос і клапани.

Монтаж обладнання, коробів і струмопроводів, а також трубопроводів виконується персоналом заводу, що включається до штатного розкладу. Особливо складні ремонтні роботи виконуються із залученням персоналу спеціалізованих організацій.

Експлуатація і будівництво розглянутих об'єктів здійснюється за рахунок вкладу власних коштів організації.

7.7.6 Екологічна довідка

В районі розміщення автономної фотоелектронасосної станції, економічна ситуація знаходиться в межах санітарних норм. Впровадження і будівництво автономної насосної станції не несе негативного впливу на екологічну ситуацію в регіоні.

7.7.7 Розрахунок техніко-економічних показників

Фінансово-економічний аналіз, а також оцінка ризиків проекту включає в себе:

- розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (собівартості виробництва, ціни реалізації, обсягу виробництва продукції, податкового навантаження та прибутку) та визначення показників інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначення обсягу інвестиційних витрат;
- визначення рівня ризикованості проекту, основних ризиків та шляхів їх запобігання.

Для вибору електрообладнання системи визначимо складові фінансових витрат:

Загальні витрати:

$$\sum K = K_0 + K_M + K_{\text{ЧП}} \quad (8.1)$$

де $K_{\text{ЧП}}$ - вартість перетворювача частоти;

K_M - витрати на монтаж обладнання;

K_0 - витрати на придбання обладнання, що включають в себе витрати на транспортування;

Так як система виконується без частотного перетворювача, то цим показником буде знехтувано.

Витрати на транспортування обладнання приймаються рівними 10% від вартості обладнання. Вартість асинхронного двигуна необхідної потужності - 220 тис. грн (по публікованих в ЗМІ прайс-листах).

$$K_0 = 0.1 \cdot C + C = 0.1 \cdot 220 + 220 = 142 \text{ (тис.грн)} \quad (8.2)$$

Витрати на монтаж системи складуть приблизно 7% від вартості обладнання:

$$K_M = 0.07 \cdot C = 0.07 \cdot 142 = 9.94 \text{ (тис.грн)} \quad (8.3)$$

Отже загальні витрати становлять:

$$\sum K = 142 + 9.94 = 151.94 \text{ (тис.грн)} \quad (8.4)$$

7.7.8 Поточні річні витрати на експлуатацію

Поточні річні витрати на експлуатацію розраховуються за формулою наведеною нижче:

$$\sum E = \text{ФОП} + C_c + M + E + A + N \quad (8.5)$$

N – накладні витрати (непрямі витрати, сюди можна віднести всі невраховані витрати - управлінські, господарські, за навчання кадрів і транспортні); Прийmemo 15% від суми всіх інших витрат.

A – амортизаційні відрахування (норми амортизаційних відрахувань для галузі не менше 5%);

E – електроенергія для виробничих потреб;

M – матеріальні витрати і запасні частини (0,5% від капітальних вкладень);

C_c – соціальний податок (22% від ФОП);

де ФОП - фонд оплати праці (основна і додаткова заробітна плата);

Для обчислення заробітної плати в таблиці 8.2 наведено середньомісячні оклади обслуговуючого персоналу.

Таблиця 8.2 - Середньомісячні оклади обслуговуючого персоналу

Перелік персоналу	Кількість	Щомісячна з/пл 1-го робітника, тис. грн.	З/пл в рік 1-го робітника, тис. грн.	Всього за рік, тис. грн
Обслуговуючий технічний персонал	1	12	144	144
Оператори для кожної зміни	3	10	120	360
Технолог	1	15	174	174
Разом:	5	37	438	678

Основна заробітна плата за рік складатиме:

$$ЗП_{\text{ОСН}} = 678 \text{ (тис.грн)} \quad (8.6)$$

При розрахунку фонду заробітної плати необхідно також врахувати премії, що складатимуть до 20%:

$$П = ЗП \cdot 0,2 = 678 \cdot 0,2 = 135,6 \text{ (тис.грн)} \quad (8.7)$$

Визначення річних витрат на електроенергію з урахуванням втрат

$$E = W \cdot I_{y,E} \cdot N = 0 \text{ (тис.грн/рік)} \quad (8.8)$$

Втрати відсутні, оскільки наша система сама себе забезпечує електроенергією за рахунок фотопанелей.

де W - річне споживання електроенергії електроприводом;

$I_{y,E}$ - тариф на електроенергію 2,31 грн/кВт·год;

N - кількість двигунів (в нашому випадку $N = 1$).

7.7.9 Фінансово-економічна ефективність інвестицій

Заходи з комерціалізації проекту мають напрямок пошуку нових інвесторів, а також просування оферти, вони передбачають:

- складання офerti - стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора з проектом;
- визначення та опис ділових інтересів цільової групи інвесторів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування офerti.
- планування заходів з просування даної офerti: визначення комунікаційних каналів, площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів.

Показник чистого приведенного доходу (Net Present Value, NPV) дозволяє зіставити величину капітальних вкладень (Invested Capital, IC) із загальною сумою чистих грошових надходжень, що генеруються ними протягом прогнозного періоду, і характеризує сучасну величину ефекту від майбутньої реалізації інвестиційного проекту. Оскільки приплив коштів розподілений у часі, він дисконтується за допомогою коефіцієнта r . Цей коефіцієнт встановлюється, виходячи з ціни інвестованого капіталу.

Чиста приведена вартість проекту це найважливіший критерій, що характеризує доцільність інвестування в даний проект. Для визначення NPV необхідно спрогнозувати величину фінансових потоків для кожного року проекту, а потім привести їх до спільного знаменника для можливості порівняння в часі. Чиста приведена вартість визначається за формулою:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (8.9)$$

де I_0 - інвестиції, тис. грн;

CF_t - готівка, тис. грн;

r – ставка дисконтування;

t - час реалізації проекту, рік.

Таблиця 8.2 - Розрахунок NPV

Рік	CF грошовий потік, тис. грн	R = 18% коэф. дисконт.	PV 18%	R = 30% коэф. дисконт.	PV 30%

0	-2631	1	-2631,83	1	-2631,83
1	1579	0,87	1373,815	0,80	1263,278
2	1579	0,76	1200,114	0,64	1010,622
3	1579	0,66	1042,204	0,51	805,339
4	1579	0,57		0,41	
5	1579	0,50		0,33	
6	1579	0,43		0,26	
7	1579	0,38		0,21	
8	1579	0,33		0,17	
9	1579	0,3		0,14	
	NPV		984,303		447,409

Розрахунок ведеться до першого позитивного значення NPV, а саме до 3-го року. NPV більше нуля, отже, при даній ставці дисконтування проект є вигідним для підприємства, оскільки генеруєма їм cash-flow перевищує норму прибутковості в даний момент часу.

Під внутрішньою нормою прибутку інвестиційного проекту (Internal Rate of Return, IRR) розуміють значення коефіцієнта дисконтування r , при якому NPV проекту дорівнює нулю, тобто при $IRR = r$.

Економічний сенс критерію IRR полягає в наступному: IRR показує максимально допустимий відносний рівень витрат за проектом. У той же час підприємство може реалізовувати будь-які інвестиційні проекти, рівень рентабельності яких не нижче поточного значення показника ціни капіталу.

Розрахуємо IRR для $r = 25\%$ банківського відсотка і методом інтерполяції за допомогою $r = 15\%$ визначимо IRR за формулою:

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (r_2 - r_1) = 18 + \frac{984.303}{984.303 + 447.409} (30 - 18) = 8.25\% \quad (8.10)$$

де r_1 - банківський відсоток в розмірі 18%;

r_2 - банківський відсоток в розмірі 30%;

$NPV_1 - NPV$ при банківському відсотку 18%;

$NPV_2 - NPV$ при банківському відсотку 30%.

IRR це індикатором ризику. За розрахунками IRR не перевищує відсоткову ставку, це є хороший показник.

Визначаємо термін окупності. Метод полягає у визначенні того терміну окупності, який необхідний для відшкодування суми початкових інвестицій.

Розрахуємо термін окупності PP:

$$PP = \frac{I_0}{CF_{\Sigma}} = \frac{2631}{1579} = 1.6(p) \quad (8.11)$$

Можна зробити висновок, що аналіз наведених фінансово-економічних показників свідчить про те, що інвестицій у розглянутий проект є ефективними (див. табл. 7.3, 7.4).

Таблиця 8.3 - Техніко-економічні показники автоматизованої лінії

Встановлена потужність	11кВт
Максимальна кількість годин максимального завантаження	2080 год/рік
Річний обсяг поставленої електроенергії	22880 кВт*год/рік
Щорічне споживання енергії	-
Комплексні капіталовкладення	2632 тис. грн
Загальна вартість електроенергії	1.45 грн
Термін погашення	1 рік 6 місяців

Таблиця 8.4 - Показники фінансово-економічної ефективності інвестицій

Індекс	1 рік	2 рік
Капітальні витрати, %	100	0
Позиковий капітал K_z , тис. грн	2632	-
Кредитний платіж, тис. грн	1579	1052
Сплата відсотків, тис. грн	60	40
Вартість обслуговування, тис. грн/рік	1648,08	-

7.8 Економічне обґрунтування технічних рішень

7.8.1 Оцінювання ринку

Потенційними клієнтами можуть бути як будь-які підприємства, так і фізичні особи, які займаються аграрною промисловістю. Так як використання відновлюваного джерела енергії є економічно вигідним.

Таблиця 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Економічність, чітке використання, прискорення виробництва, надійність	Підприємства, які займаються аграрною промисловістю чи водопостачанням	Використання в якості джерела енергії фотопанель	Використовувати лише в деякому затвердженому діапазоні

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Новий продукт	Не введена в експлуатацію система потребує часу на дослідження	Збільшений період обговорення домовленості
2	Фінансування персоналу (розробників)	Наукові кадри потребують значного фінансування	Затяжний період обговорення домовленості

Таблиця 8.7 - Фактори конкуренції

№ п/п	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	За рівнем конкурентної боротьби: національний	Даний продукт зацікавить всі регіони	Велика реклама

2	За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Можливість застосування на багатьох підприємствах	Розробка більш широкого застосування
3	Монополія	Виробником постає одна фірма	Унікальність продукту
4	За характером конкурентних переваг - цінова	Відіграватиме важливу роль між конкурентами	Зміна цінової політики

Таблиця 8.8 - Фактори можливості

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Розширення зацікавлених в продукті	Малі та середні підприємства зацікавляться в новій технології	Позитивна
2	Залучення зовнішніх інвесторів	Зовнішні інвестори можуть зацікавитись технологією	Позитивна

Таблиця 8.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкурент и в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальни ки	Клієнти	Товари замінники
	ПСМ, Redrollo	Незацікавленіс ть покупців і інвесторів в економії	Власна компанія	Підприємства націлені на аграрне виробництво	Конкурентні товари
Висновки	Простота реалізації		Постачальни к диктує умови	Залежить від умов реалізації	-

У товару майже немає конкурентів, це і стало головною ідеєю. За рахунок цього він і буде привабливим для покупців та підприємств.

7.8.2 Розробка ринкової стратегії

Таблиця 8.10 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Заводи	Швидка	Товар має великий попит	Жодної	Залежить від фахівця
2	Приватні підприємства	Найшвидша	Товар був розроблений для цих цілей	Жодної	Залежить від фахівця
3	Приватні особи	Найшвидша	Товар був розроблений для цих цілей	Жодної	Залежить від фахівця
У якості цільових груп обрано всі три					

Оскільки компанія зосереджена на трьох сегментах розвитку, то використовуватиметься диференційована стратегія маркетингу.

Таблиця 8.11 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект “першопрохідцем” на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або перетягувати існуючих від конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки?
Так	Так, так	Ні	Диференціації

Таблиця 8.12 - Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Гнучкість, легкість налаштування	Залучення більшого числа користувачів	Новинка	Економія та окупність

Ціллю даного напрямку є створення продукту, який відрізняється від аналогів, які існують, та покращення його, на платформах, які можуть використовувати даний продукт.

7.8.3 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 8.13 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Інвестори та фахівці	Економічність, чітке використання, прискорення виробництва, надійність	Аналогів даного продукту немає

Висновки по розділу

1. В розділі представлено стартап-проект, що складається з аналізу та економічного обґрунтування технічних рішень.
2. Здійснено розрахунок техніко-економічних показників, які далі застосовуються у якості річних витрат на експлуатацію.
3. Наведено оцінювання ринку, в якому враховано основні фактори, які впливають на реалізацію проекту, а саме фактори загроз, можливостей і конкуренції.
4. Отримані результати свідчать про конкурентоспроможність проекту і доцільність його впровадження.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації розглянуте питання створення автономного джерела водопостачання на основі фотоелектричного відновлюваного джерела живлення, яке поєднане з електроприводом на основі асинхронного двигуна з автономним інвертором. При цьому отримано наступні результати:

1. За результатами проведеного аналітичного огляду науково-технічної літератури було виявлено, що для отримання максимальної потужності від фотопанелі слід застосовувати алгоритми MPPT, так як це підвищить ефективність фотоелектричної станції в цілому.

2. Показано, що для збільшення вироблення електроенергії фотопанель слід об'єднати з приводом повороту панелі. За рахунок правильного кута повороту панелі отримується більше значення опромінення, а також температури, що і є головними факторами впливу на потужність.

3. Проведено аналіз способів керування електроприводом, в результаті чого було доведено, що при взаємодії асинхронного двигуна з насосом кращим варіантом буде використання частотного керування.

4. Здійснено моделювання фотопанелі, як окремої складової. Досліджено вплив опромінення і температури на вироблену потужність, а також вплив послідовних та паралельних опорів в її модулях.

5. Промодельовано систему автономного водопостачання в пакеті MATLAB/Simulink. В результаті отримано графіки перехідних процесів. Система працює адекватно, що свідчить про правильність вибору електродвигуна і розрахунку параметрів системи.

6. За результатами розробки стартап-проекту встановлено, що у проекту є наявний попит на ринку збуту, динаміка ринку зростає. Також слід зазначити, що проект є інноваційним і конкурентоспроможним за рахунок використання відновлюваного джерела енергії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Теряєв В.І., Федорос Ю.М. Взаємозв'язана система електроприводів автономної фотоелектричної насосної станції. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. Київ, 2020
2. Єгорова О. Ю. Комплексне забезпечення надійності і якості електропостачання у сільських розподільних мережах / О. Ю. Єгорова //Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. –2016. –No2. –С. 41-43.
3. Савченко В. В. Вплив якості електричної енергії на технологічні процеси в рослинництві / В. В. Савченко, О. Ю. Синявський //Енергетика і автоматика. –2015. – No2. – С. 47-54.
4. Синявський О. Ю. Вплив відхилення показників якості електроенергії на технологічну складову збитку в тваринництві / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко //Енергетика та автоматика. –2016. –No 1.–С. 59-67.
5. Калінчик В.П., Сунко С.А. Способи побудови енергетичних комплексів за участю комбінованих систем електропостачання/Матеріали IV Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'17» - Київ. – 2017. – С. 31-32.
6. В.Калінчик, С. А.Сунко. Енергетичні комплекси на базі комбінованих систем електропостачання// Збірник наукових праць. Матеріали XXXVII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції „Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії” – Переяслав-Хмельницький. – 2017.- С.163-165.
7. Лукутин Б.В. Децентрализованные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие/ Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 100 с.

8. Виссарионов, В. И. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / В.И. Виссарионов, С.В. Белкина, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин - М., 2004. 448 с.
9. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків / Бурбело М.Й. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2005. – 148 с
10. Елистратов В.В., Конищев М.А. Ветро дизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России // Альтернативная энергетика и экология, №11 (151) / 2014
11. A. O. Omole, "Analysis, modeling and simulation of optimal power tracking of multiple-modules of paralleled solar cell systems," Master of Science Thesis, The Florida State University College of Engineering, 2006.
12. K. H. Hussein, et al., "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, vol. 142, pp. 59-64, 1995.
13. E. Koutroulis, et al., "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 16, pp. 46-54, 2001.
14. L. Fangrui, et al., "Comparison of P&O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV converter," in Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on, 2008, pp. 804-807.
15. T. Noguchi, et al., "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 49, pp. 217-223, 2002.
16. J. Ahmad, "A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays," in Software Technology and Engineering (ICSTE), 2010 2nd International Conference on, 2010, pp. V1-247-V1-250.

17. V. Salas, et al., "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, 2006.
18. T. Hiyama, et al., "Identification of optimal operating point of PV modules using neural network for real time maximum power tracking control," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 360-367, 1995.
19. R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, "A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 57-65, 1996.
20. R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, pp. 446-455, 2008.
21. R. Faranda and S. Leva, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS transactions on power systems*, vol. 3, pp. 446-455, 2008.
22. N. Khaehintung, et al., "FPGA implementation of MPPT using variable step-size P&O algorithm for PV applications," in *Communications and Information Technologies, 2006. ISCIT'06. International Symposium on*, 2006, pp. 212-215.
23. N. Fermia, et al., "Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 934-950, 2007.
24. H. Wang, et al., "Adaptive maximum power point tracker in photovoltaic grid-connected system," in *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 374-377.
25. D. Sera, et al., "Optimized maximum power point tracker for fast changing environmental conditions," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 2401-2407.
26. W. Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 1957-1963.

27. J. Xu, et al., "ANN based on IncCond Algorithm for MPP Tracker," in *Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, 2011 Sixth International Conference on, 2011, pp. 129-134.
28. J. M. Enrique, et al., "A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications," *Solar energy*, vol. 84, pp. 79-89, 2010.
29. C. Jaen, et al., "Overview of maximum power point tracking control techniques used in photovoltaic systems," 2008, pp. 1099-1102.
30. V. Salas, et al., "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 1555-1578, 2006.
31. B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 89-98, 2013.
32. P. Bhatnagar and R. Nema, "Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 224-241, 2013.
33. M. A. Eltawil and Z. Zhao, "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 793-813, 2013.
34. X. Weidong and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 1957-1963 Vol.3.
35. D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed," in *Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, 2000, pp. 1699-1702.
36. T. Tafticht, et al., "A new MPPT method for photovoltaic systems used for hydrogen production," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 26, pp. 62-74, 2007.

37. T. Tafticht, et al., "An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1508-1516, 2008.
38. N. Onat, "Recent developments in maximum power point tracking technologies for photovoltaic systems," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2010, 2010.
39. W. Xiao, "A modified adaptive hill climbing maximum power point tracking (MPPT) control method for photovoltaic power systems," Master Thesis The University of British Columbia, 2003.
40. H. Knopf, "Analysis, Simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle," Master Thesis, Portland State University, 1999.
41. H. Yongji and L. Deheng, "A new method for optimal output of a solar cell array," in *Industrial Electronics, 1992., Proceedings of the IEEE International Symposium on*, 1992, pp. 456-459.
42. C. Hua and C. Shen, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC'98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*, 1998, pp. 679-685.
43. Khaligh and O.C. Onar, *Energy harvesting solar, wind, and ocean energy conversion systems*, CRC Press, New York, 2010.
44. J.M. Shen, H.L. Jou and J.C. Wu, "Novel transformer less grid connected power converter with negative grounding for photovoltaic generation system", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1818-1829, Apr. 2012.
45. H. Moussa, M. Fadel and H. Kanaan, "A single-stage DC-AC boost topology and control for solar PV systems supplying a PMSM", in *Proc REDEC Conf.*, Nov. 2012, pp. 1-7.
46. R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, New York, 2010.

47. B.A. Essalam and K. Mabrouk, “Grid-Connected Modeling, Control and simulation of single phase two-level photovoltaic power generation system coupled to a permanent magnet synchronous,” Proc. IEEE WOSSPA Workshop, May 2011, pp. 29-34.
48. F. Mayssa, F. Aymen and S. Lassaad, “Influence of photovoltaic DC bus voltage on the high speed PMSM drive”, Proc. IEEE IECON Conf., Oct. 2012 , pp. 4489 – 4494.
49. B.N. Singh, P. Rastgoufard, B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, “Design, simulation and implementation of three-pole/four-pole topologies for active filters”, Proc. IEE, Elect. Power Appl., vol. 151, no. 4, pp. 467–476, Jul. 2004.
50. M. Dubey, S. Sharma, R. Saxena, “Solar PV Stand-Alone Water Pumping System Employing PMSM Drive”, IEEE Student’s Conference on Electrical, Electronics and Computer Science SCEECS 2014.
51. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.powerunit.ru/catalog/diesel_pumpset/flanged_pumps/dnu_144_88/
52. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. /Лезнов Б. С. // М.: Энергоатомиздат, 2006. 360с.
53. Электронный ресурс. URL: <http://pedrollo.trade/nasosy/nasos-pedrollo-f-40-250-b-380v>
54. Электронный ресурс. URL: <https://lbu.com.ua/images/catalog/abb/el-dvig-obshego-naznacheniya-m2aa-m2bax-2017-ru.pdf>
55. Кравчик А. Э. Соболенская. М А. Шлаф, В. И Асинхронные двигатели серии 4А: *Київ*, 1982. 34 — 90 с.
56. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
57. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский

государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. – 298 с.

58. «Трубопроводный транспорт нефти и газа». Учебник для вузов. Под редакцией Вайнштока С. П., – М.:1999.

59. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., «Общий курс электропривода». Учебник для вузов . – 6е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981.

60. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов, Е. Д. Лебедев, Л. М. Тарасенко. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.

61. Walker, Geoff, 2001. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. Aust. J. Electr. Electron. Eng. 21 (1).

62. Benmessaoud, M.T., Boudghene Stambouli, A., Midoun, A., Zegrar, M., Zerhouni, F.Z., Zerhouni, M.H., 2010. Proposed methods to increase the output efficiency of a photovoltaic (PV) system. Acta Polytech. Hung. 7 (2), 11.

63. Atlas, H., Sharaf, M., 1992. A fuzzy logic power tracking controller for a photovoltaic energy conversion scheme. Electr. Power Syst. Res. 25, 227–238.

64. Beckman, W.A., Klein, S.A., Kou, Q., A method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct-Coupled Pv Pumping Systems, University Of Wisconsin Solar Energy Laboratory. 1500 Engineering Drive, Madison, U.S.A.

65. Bryan F., 1999, Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems. MS thesis. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.

66. Bouzid, A., Chenni, R., Kerbach, T., Makhlouf, M., 2005. A Detailed Modeling Method for Photovoltaic Cells Energy. Elsevier.

67. Электронный ресурс. URL: <https://solar.biz.ua/AXM144-9-166-445-eng.pdf>

68. Anne, Labouret, Michel, Villosz., Energie photovoltaïque. (Dunod 3e`me e`dition 2006).

69. Sheik Mohammed, S., 2011. Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink. *Int. J. Chem. Environ. Eng.* 2 (5).
70. Chouder, A., Rahmani, L., Sadaoui, N., Silvestre, S., 2012. Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters. *Simul. Model. Pract. Theory* 20, 46–58.
71. De Soto, W., 2006. Improvement And Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance By Solar Energy, 80, 78-88.
72. Townsend, T.U., 1989, Method For Estimating The Long-Term Performance Of Direct Coupled Photovoltaic Systems. M.S. Thesis, Mechanical Engineering, U. Of Wisconsin Madison.
73. Bernard Equer, *Energie solaire photovoltaïque* (Ellipses 2004).
74. Электронный ресурс. URL: <https://www.semikron.com/dl/servicesupport/downloads/download/semikron-datasheet-sk-120-gb-12f4-t-24919720.pdf>
75. Электронный ресурс. URL: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skyper-32-pro-r-l6100202/>
76. Электронный ресурс. URL: https://tmelectronics.ru/files/pdf/f8bb81924302b9bda05ba4d6c78e9132/m0_6w.pdf
77. Электронный ресурс. URL: <http://www.cheemi-tech.com/pdf/Open-loop%20hall%20current%20transducer%20CHK-BR15S4.pdf>
78. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Lv25-p&gclid=Cj0KCQjwn7j2BRDrARIsAHJkxmWkp9RFR_sd7QqquzxZcl8530mNcs9ruR-XA_V1xgQcTC2_E7gklZUaAoHzEALw_wcB
79. Электронный ресурс. URL: https://www.tme.eu/Document/f75e6569bce6e929e7f2b97f4dc9bedc/PR_Vishay.pdf

